



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*

*Mestrado - Doutorado*

**DESEMPENHO TERMODINÂMICO, AMBIENTAL E  
SOCIAL DE COLHEITA DE ENERGIA A PARTIR DE  
ATIVIDADES FÍSICAS**

por

Herwin Saito Schultz

*Tese de doutorado apresentado à Universidade Federal da Paraíba  
para obtenção do grau de Doutor.*

**João Pessoa - Paraíba**

**Fevereiro, 2026**

**HERWIN SAITO SCHULTZ**

**DESEMPENHO TERMODINÂMICO, AMBIENTAL E  
SOCIAL DE COLHEITA DE ENERGIA A PARTIR DE  
ATIVIDADES FÍSICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica  
da Universidade Federal da Paraíba,  
em cumprimento às exigências para  
obtenção do Grau de Doutor.

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Monica Carvalho**

**Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Keutenedjian Mady**

**João Pessoa - Paraíba**

**Fevereiro, 2026**

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

S387d Schultz, Herwin Saito.

Desempenho termodinâmico, ambiental e social de colheita de energia a partir de atividades físicas / Herwin Saito Schultz. - João Pessoa, 2026.  
192 f. : il.

Orientação: Monica Carvalho.

Coorientação: Carlos Eduardo Keutenedjian Mady.  
Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Geração de eletricidade. 2. Redução da pegada de carbono. 3. Exercícios físicos - Saúde pública. 4. Avaliação de ciclo de vida - ACV. I. Carvalho, Monica. II. Mady, Carlos Eduardo Keutenedjian. III. Título.

UFPB/BC


CDU 621.31(043)

# DESEMPENHO TERMODINÂMICO, AMBIENTAL E SOCIAL DE COLHEITA DE ENERGIA A PARTIR DE ATIVIDADES FÍSICAS


por

**HERWIN SAITO SCHULTZ**


*Tese aprovada em 27 de fevereiro de 2026*

Documento assinado digitalmente  
 **MONICA CARVALHO**  
Data: 01/03/2026 10:05:32-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


**Profa. Dra. Monica Carvalho**  
Orientadora – UFPB

Documento assinado digitalmente  
 **CARLOS EDUARDO KEUTENEDJIAN MADY**  
Data: 02/03/2026 09:12:44-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


**Prof. Dr. Carlos Eduardo Keutenedjian Mady**  
Coorientador – USP

Documento assinado digitalmente  
 **ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO**  
Data: 02/03/2026 13:28:15-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


**Prof. Dr. Abel Cavalcante Lima filho**  
Examinador Interno – UFPB

Documento assinado digitalmente  
 **CICERO DA ROCHA SOUTO**  
Data: 02/03/2026 17:44:50-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Cícero da Rocha Souto**  
Examinador Interno – UFPB

Documento assinado digitalmente  
 **RAFAEL FERNANDES MOSQUIM**  
Data: 03/03/2026 14:43:42-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Rafael Fernandes Mosquim**  
Examinador Externo – UNICAMP

Documento assinado digitalmente  
 **SILVIO DE OLIVEIRA JUNIOR**  
Data: 04/03/2026 10:36:29-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Sílvio de Oliveira Júnior**  
Examinador Externo – USP

## AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, da sabedoria, da perseverança e do amor: sem Ele, nada seria possível.

À minha orientadora Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Monica Carvalho e ao meu coorientador Prof. Dr. Carlos Eduardo Keutenedjian Mady por todas as orientações, apoio, direcionamento, confiança e compreensão.

À minha esposa Flávia Danielle Santos Oliveira e ao meu filho Pedro Oliveira Schultz pelo apoio e incentivo, pela convivência e por estarem sempre ao meu lado na luta pela realização deste meu objetivo.

Ao meu pai Paulo de Tarso Schultz (*in memoriam*) e à minha mãe Kazue Saito Schultz por toda ajuda financeira e por todo apoio que me deram não só durante este curso, mas em toda a minha vida.

Ao meu sogro Davi Gentil de Oliveira e a minha sogra Ginarajadaça Ferreira dos Santos Oliveira, por toda a torcida e incentivo.

A todos os integrantes do LAVAE (Laboratório de Avaliação Ambiental e Energética) em especial ao Prof. Dr. Raphael Abrahão e à Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Monica Carvalho por toda a ajuda e estrutura fornecida para a realização dos testes práticos. Aos companheiros de laboratório, Gabriela Tourinho de Matos Ricardino, Heitor do Nascimento Andrade, Inês Delesalle e Yuri Kairos Santos Silva, pela convivência, trocas de conhecimento e toda a ajuda na realização dos testes.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro durante a vigência deste curso.

A todos que de alguma maneira contribuíram para este trabalho.

## DESEMPENHO TERMODINÂMICO, AMBIENTAL E SOCIAL DE COLHEITA DE ENERGIA A PARTIR DE ATIVIDADES FÍSICAS

### RESUMO

Um Sistema de Colheita de Energia (SCE) a partir da prática de exercício físico pode abordar questões de sustentabilidade energética e de saúde pública. O *Greener&Healthier Power* (GHP) é um SCE que possui como inovação conceitual um aplicativo de treino que possui a opção de seleção automática da intensidade de esforço, simulando situações mais próximas da realidade da prática ao ar livre e ainda controla parâmetros ambientais. A ideia que apoia o GHP é incentivar a prática de atividade física, reduzindo o risco de surgimento de Doenças Crônicas não Transmissíveis (DCNT) e podendo contribuir para a redução dos custos de Saúde Pública. Partindo de uma Fazenda de Colheita de Energia (FCE) composta por 32 bicicletas estacionárias, responsáveis por coletar energia e fornecer à rede, este estudo tem o objetivo de desenvolver uma análise técnica e avaliar o desempenho termodinâmico, ambiental e social de FCEs. Utiliza-se a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para quantificar as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) associadas à composição da FCE. Os resultados revelam que um ciclista em 1 hora pode gerar em média 75,5 Wh, que uma FCE tem capacidade geração de 8.167,9 kWh/ano e que seu fator de emissão é de 0,090 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh, significativamente inferior ao da rede elétrica nacional brasileira (0,152 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh). Para um investimento de R\$ 208 milhões, a redução estimada de custos com Saúde Pública variou entre R\$ 532 milhões e R\$ 2,91 bilhões. Conclui-se que o GHP é um sistema interativo e conectado, capaz de realizar a colheita de energia de ciclismo *indoor*, reduzir a pegada de carbono, melhorar a qualidade de vida da população e com potencial de redução de custos com Saúde Pública.

Palavras-chaves: Redução da pegada de carbono; geração de eletricidade; exercícios físicos; melhoria da saúde pública; avaliação de ciclo de vida.

## **THERMODYNAMIC, ENVIRONMENTAL AND SOCIAL PERFORMANCE OF ENERGY HARVESTING FROM PHYSICAL ACTIVITIES**

### **ABSTRACT**

An Energy Harvesting System (EHS) based on physical exercise can address issues of energy sustainability and public health. Greener&Healthier Power (GHP) is an EHS that features a conceptual innovation: a training app with automatic intensity selection, simulating situations closer to the reality of outdoor exercise, and also controlling environmental parameters. The idea behind GHP is to encourage physical activity, reducing the risk of developing Non-Communicable Chronic Diseases (NCDs) and potentially contributing to lower public health costs. Based on an Energy Harvesting Farm (EHF) composed of 32 stationary bicycles responsible for collecting energy and supplying it to the grid, this study aims to develop a technical analysis and evaluate the thermodynamic, environmental, and social performance of EHF. Life Cycle Assessment (LCA) is used to quantify the Greenhouse Gases (GHG) emissions associated with the EHF composition. The results reveal that a cyclist in one hour can generate an average of 75.5 Wh, that an EHF has a capacity of 8,167.9 kWh/year, and that its emission factor is 0.090 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh, significantly lower than that of the Brazilian national electricity grid (0.152 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh). For an investment of R\$ 208 million, the estimated reduction in public health costs ranged from R\$ 532 million to R\$ 2.91 billion. Therefore, it can be concluded that the GHP is an interactive and connected system capable of harvesting energy from indoor cycling, reducing the carbon footprint, improving the population's quality of life, and with the potential to reduce public health costs.

**Keywords:** Reduction of carbon footprint; electricity generation; physical exercises; improving public health; life cycle assessment.

## SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	8
LISTA DE FIGURAS .....	13
LISTA DE TABELAS .....	15
LISTA DE SÍMBOLOS .....	17
CAPÍTULO I – APRESENTAÇÃO .....	19
1. INTRODUÇÃO .....	19
1.1. Justificativa.....	23
1.2. Inovação conceitual da proposta.....	23
1.3. Objetivos.....	26
1.3.1. Objetivo Geral .....	26
1.3.2. Objetivos Específicos .....	26
1.4. Contribuição .....	26
CAPÍTULO II – REFERENCIAL TEÓRICO .....	28
2.1. Colheita de Energia ( <i>Energy Harvesting</i> ) .....	28
2.2. Geração de energia em comunidades isoladas (remotas) .....	31
2.3. Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).....	33
2.4. Prática de Atividades Físicas e seus Benefícios .....	36
2.4.1. O Impacto de Bicicletas Estacionárias Geradoras de Energia na Saúde Cardiovascular dos Praticantes.....	41
2.5. Estado da Arte .....	42

CAPÍTULO III – MATERIAL E MÉTODOS .....	45
3.1. Volume de controle macro .....	45
3.2. O fluxograma de determinação dos parâmetros ambiental e de energia .....	46
3.3. Geração de Energia.....	49
3.3.1. Montagem do protótipo e procedimento de testes.....	51
3.3.2. 1º procedimento de teste.....	56
3.3.3. 2º procedimento de teste.....	58
3.3.4. Cálculo das Variáveis (Energia).....	60
3.3.4.1. Preparação dos dados para a análise.....	69
3.3.5. Análise dos dados de testes. ....	70
3.3.6. Calibração dos sensores de medição .....	71
3.3.7. Propagação dos erros .....	71
3.3.8. Montagem do conjunto para uso .....	72
3.4. Aplicativo GHP ( <i>Greener&amp;Healthier Power</i> ) .....	75
3.4.1. Telas: <i>Login</i> e Cadastro de Novo Usuário.....	76
3.4.2. Tela: Menu Principal .....	77
3.4.3. Tela: “Treinos Pré-Programados” .....	78
3.4.4. Tela: “Iniciante1” .....	80
3.4.5. Sistema de Automação da Intensidade de Treino.....	83
3.4.6. Tela “Treino de Controle Manual” .....	84
3.4.7. Tela “Totalizador” .....	87
3.4.8. Tela “Alteração de Usuário e Senha” .....	88
3.4.9. Botão “Sair”.....	88
3.4.10. Cálculos utilizados no aplicativo GHP .....	88

3.5.	Análise Ambiental .....	91
3.5.1.	Elaboração do inventário .....	91
3.5.2.	Avaliação de Impacto Ambiental .....	93
3.5.3.	Comparativo das emissões da FCE com <i>mix</i> Brasil .....	93
3.5.4.	Cálculo das Variáveis (Ambiental).....	94
3.6.	Potencial de redução de custo com Saúde Pública.....	98
3.6.1.	Investimentos necessários para instalação de uma FCE e abrangência do projeto . .....	99
3.6.2.	Estimativa de valor gerado com a colheita de energia de uma FCE .....	99
3.6.3.	Potencial de redução de custos com Saúde Pública, em função da melhoria das condições de saúde da população. ....	99
3.7.	Um Protocolo de Ensaio Randomizado Controlado Cego: Avaliando o Impacto de Bicicletas Estacionárias Geradoras de Energia na Saúde Cardiovascular.....	100
3.7.1.	Desenho do Estudo e Participantes.....	100
3.7.2.	Intervenção .....	101
3.7.3.	Procedimentos .....	104
3.7.4.	Variáveis.....	105
3.7.5.	Análise Estatística .....	105
3.7.6.	Considerações Éticas .....	106
3.7.7.	Resultados Esperados .....	106
CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....		108
4.1.	Geração de Energia.....	108
4.1.1.	1º procedimento de testes .....	108
4.1.2.	2º procedimento de testes .....	114
4.1.3.	Pós Regressão .....	117

4.1.4.	Rendimento Global ( $h_{global}$ ) .....	119
4.1.5.	Capacidade de Colheita de energia da FCE em 10 anos ( $FCE_{total}$ ) .....	121
4.2.	Análise Ambiental .....	122
4.2.1.	Potencial de mitigação de mudanças climáticas associado ao SCE .....	122
4.2.2.	Emissões Geradas pela Variação de Dietas .....	125
4.3.	Potencial de redução de custos com Saúde Pública .....	129
4.4.	Análise Comparativa com Estudos Anteriores .....	133
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES .....		135
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	135
REFERÊNCIAS .....		137
ANEXOS .....		146
	Anexo 1 - Conjunto de 04 Peças de Célula de Carga Sensor de Peso 50 kg e 1 Módulo HX711 .....	146
	Anexo 2 - Alternador Solarhome (12 V / 20 A / CH15587) .....	148
	Anexo 3 - Ponte Retificadora (KBPC2510 / 25A / 1000 V) .....	149
	Anexo 4 - Capacitor Eletrolítico (10000uF / 25 V) .....	150
	Anexo 5 - Capacitor Cerâmico (10 uF / 50 V) .....	151
	Anexo 6 - Sensor de Tensão (0 - 25 Vdc) .....	152
	Anexo 7 - Sensor de Corrente (20 A) .....	153
	Anexo 8 - Microcontrolador (Arduino Uno) .....	154
	Anexo 9 - Chave interruptora (KN-1021) .....	155
	Anexo 10 - Lâmpada (55 W) .....	156
	Anexo 11 - Microcontrolador (Arduino Mega) .....	157
	Anexo 12 - Sensor de Rotação (Infra Vermelho) .....	158
	Anexo 13 - Multímetro Digital MINIPA-ET-1507B .....	159
	Anexo 14 - Tacômetro digital a laser TDV 100 VONDER .....	161
	Anexo 15 - Balança de precisão 10KG .....	162
	Anexo 16 - Microcontrolador ESP32-WROOM-32 Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6 .....	163
	Anexo 17 - Módulo Relé 3 V / 10 A / 8 Canais com Borne KRE para ESP32 .....	164
APÊNDICES .....		165
	Apêndice 1 - Sketch para Arduino – Circuito 1 .....	165
	Apêndice 2 - Sketch para Arduino – Circuito 2 .....	167

Apêndice 3 - Colheita de energia em função do preparo físico.....	168
Apêndice 4 - Propagação dos erros.....	170
Apêndice 5 - Sketch para ESP 32 – Montagem para uso .....	171
Apêndice 6 - Programação da tela "Login" e “Cadastro de novo usuário” do aplicativo .....	175
Apêndice 7 - Programação da tela "Menu Principal" do aplicativo .....	176
Apêndice 8 - Programação da tela "Treino Pré-Programado" do aplicativo .....	177
Apêndice 9 - Variação dos treinos de Iniciante .....	178
Apêndice 10 - Programação da tela "Iniciante1" do aplicativo. ....	180
Apêndice 11 - Automação dos Treinos Pré-Programados.....	181
Apêndice 12 - Programação da tela "Treino com Controle Manual" do aplicativo .....	183
Apêndice 13 - Programação da tela "Totalizador" do aplicativo.....	184
Apêndice 14 - Programação da tela "Alteração de Usuário e Senha" do aplicativo.....	185
Apêndice 15 - Gráficos de Normalidade Anderson-Darling .....	186
Apêndice 16 - Rendimento Global para todos os Níveis de Treino .....	191
Apêndice 17 - Fator de emissões de GEE de cada material .....	192
Apêndice 18 - Variação do $TE_{mix}$ brasileiro.....	193
Apêndice 19 - Cálculo das emissões geradas por kg de proteína .....	194

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fazenda de Colheita de Energia (FCE) .....	25
Figura 2 - Conjunto gerador de eletricidade a partir da prática de atividades físicas.....	27
Figura 3 - Tecnologias de colheita de energia.....	29
Figura 4 - População sem acesso à energia na Amazônia Legal .....	31
Figura 5 - Sistemas Isolados – Ciclo 2022. ....	33
Figura 6 - Fases de uma ACV. ....	35
Figura 7 - Processo de Refinamento das Informações. ....	36
Figura 8 - Diagrama de Sankey do processo de conversão de energia humana.....	37
Figura 9 - Diagrama de Grassmann do trabalho produzido pelo corpo humano a partir dos nutrientes disponíveis na energia.....	38
Figura 10 - Esquema de um teste ergométrico, com fluxos de energia. O trabalho que sai do sistema humano é a energia aqui colhida. ....	39
Figura 11 - Volume de controle macro.....	45
Figura 12 - Fluxo com os parâmetros a serem calculados.....	47
Figura 13 - Disposição física dos sensores e componentes do SCE.....	49
Figura 14 - Sistema de transmissão do SCE.....	51
Figura 15 - Interface do Arduino IDE e função " <i>Show timestamp</i> " .....	53
Figura 16 - Esquema do circuito 1 de monitoramento de testes.....	54
Figura 17 - Esquema do circuito 2 de monitoramento de testes.....	55
Figura 18 - Esquema de Força Durante a Pedalada.....	61
Figura 19 - Torque com Pedivela Inclinado. ....	62
Figura 20 - Critério de Sincronização de Dados.....	70
Figura 21 - Fluxo de Comunicação do SCE no modo para uso .....	73
Figura 22 - Esquema de funcionamento do modo para uso. ....	74
Figura 23 - Esquema de telas do aplicativo GHP .....	76

Figura 24 - Telas do Aplicativo: <i>Login</i> , Cadastro de Novo Usuário.....	77
Figura 25 - Tela do aplicativo: Menu Principal.....	78
Figura 26 - Telas do aplicativo: Treinos Pré-Programados.....	79
Figura 27 - Telas: "Iniciante 1" .....	81
Figura 28 - Exemplo de treino pré-programado "Iniciante1".....	81
Figura 29 - Tela: "Iniciante 1" - Lógica de utilização .....	82
Figura 30 - Automação do Controle e Esforço e Tempo de Duração .....	84
Figura 31 - Tela do aplicativo: Treino com Controle Manual.....	85
Figura 32 - Tela: "Treino com Controle Manual" - Lógica de utilização .....	86
Figura 33 - Tela do aplicativo: "Totalizador".....	87
Figura 34 - Tela do aplicativo: "Alteração de Usuário e Senha".....	88
Figura 35 - Sequência de obtenção das emissões das variações de dietas .....	96
Figura 36 - Participação das fontes de proteína no consumo diário per capita do brasileiro .....	96
Figura 37 - Sistema de coleta de energia de bicicletas - a instalação Greener&Healthier Power. Fotografia tirada e editada por Inès Delesalle. Usada com permissão.....	101
Figura 38 - Gráficos de efeitos principais .....	110
Figura 39 - Regressão - Gráficos de linha ajustada.....	112
Figura 40 - Força Total Instantânea e Força Total Média em função do tempo. ....	114
Figura 41 - Gráfico de efeito principal .....	116
Figura 42 - Gráfico de Linha Ajustada.....	116
Figura 43 - Curvas de Potência do Pedivela.....	118
Figura 44 - Curvas de Potência Coletada .....	118
Figura 45 - Rendimento do SCE.....	119
Figura 46 - Rendimento Global para o Nível de Treino 1 (Base) .....	120
Figura 47 - Participação dos principais componentes e materiais nas emissões de GEE .	123
Figura 48 - Participação das fontes de proteína nas emissões de GEE .....	126
Figura 49 - Percentual de emissões em relação a carne bovina.....	127

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de energia para diferentes atividades (valores para homens).....	30
Tabela 2 - Potência da atividade física do ser humano.....	40
Tabela 3 - Sequência de cálculo das variáveis .....	48
Tabela 4 - Equações de potência de colheita e potência acionamento no pedivela.....	50
Tabela 5 - Componentes utilizados no procedimento de testes.....	55
Tabela 6 - Dados coletados no 1º procedimento de testes.....	58
Tabela 7 - Dados coletados no 2º procedimento de testes.....	60
Tabela 8 - Níveis de treino de acordo com o preparo físico.....	65
Tabela 9 - Colheita de energia em função do preparo físico .....	67
Tabela 10 - Percentual de ciclistas por nível de preparo físico .....	68
Tabela 11 - Coeficientes r de correlação de Pearson.....	71
Tabela 12 - Componentes utilizados no Modo para Uso.....	75
Tabela 13 - Relação de tempo e nível de esforço por nível de preparo físico.....	79
Tabela 14 - Componentes que compõem uma FCE .....	92
Tabela 15 - Materiais que compõem uma FCE .....	93
Tabela 16 - Relação de fontes de proteína.....	97
Tabela 17 - Tipo de correlação entre variáveis.....	109
Tabela 18 - Teste de Normalidade de Anderson-Darling ( $p\text{-value} > 0,05$ ).....	111
Tabela 19 - Equações das curvas de geração.....	113
Tabela 20 - Força Total Média e Número de lâmpadas .....	115
Tabela 21 - Tipo de correlação entre variáveis.....	115
Tabela 22 - Rendimento Global por Nível de Treino (2 treinos de 30 min) .....	120
Tabela 23 - Média ponderada de colheita de energia .....	121
Tabela 24 - Determinação da Capacidade de Colheita de Energia de uma FCE em 10 anos .....	121
Tabela 25 - Emissões associadas aos componentes e materiais da FCE.....	122

Tabela 26 - Emissões de GEE evitadas pela FCE em 10 anos .....	124
Tabela 27 - Consumo médio diário de diferentes fontes de proteínas em função da massa corporal.....	125
Tabela 28 - Emissões totais de GEE a partir do consumo diário de proteína.....	126
Tabela 29 - Análise de fontes substitutas para a carne bovina .....	127
Tabela 30 - Emissões totais de GEE com a substituição da carne bovina pela de ave .....	128
Tabela 31 - Emissões evitadas em 10 anos pela variação de fonte de proteína .....	129
Tabela 32 - Composição de preço de um SCE .....	130
Tabela 33 - Composição de preço de uma FCE .....	131
Tabela 34 - Valor anual gerado em função da colheita de energia de uma FCE.....	131
Tabela 35 - Resumo da análise de redução de custos com Saúde Pública .....	133

## LISTA DE SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ADP	Difosfato de Adenosina
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	Adenosina Trifosfato
BEN	Balanco Energético Nacional
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCC	Conta de Consumo de Combustível
CI	Chave Interruptora
DCNTs	Doenças Crônicas Não Transmissíveis
DCV	Doenças Cardiovasculares
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FCE	Fazenda de Colheita de Energia
GD	Geração Descentralizada
GEE	Gases de Efeito Estufa
GHP	<i>Greener&amp;Healthier Power</i>
GC	Grupo Controle
GI	Grupo de Intervenção
GI1	Grupo de Intervenção sem Geração de Energia
GI2	Grupo de Intervenção com Geração de Energia
IEMA	Instituto de Energia e Meio Ambiente
IMC	Índice de Massa Corporal
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>

	(Organização Internacional de Normalização)
	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MIT	(Instituto de Tecnologia de Massachusetts)
NBR	Norma Brasileira
OMS	Organização Mundial de Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
Pi	Íons Fosfato
PIB	Produto Interno Bruto
SC	Sensor de Corrente
SCE	Sistema de Colheita de Energia
SFP	Saída de Força no Pedal
SGC	Sistemas de Geração Centralizada
SI	Sistemas Isolados
SR	Sensor de Rotação
SIN	Sistema Interligado Nacional
ST	Sensor de Tensão
SUS	Sistema Único de Saúde
UC	Unidades de Conservação

## CAPÍTULO I – APRESENTAÇÃO

### 1. INTRODUÇÃO

O aumento constante da população mundial e o conseqüente crescimento no consumo de energia elétrica requer uma quantidade cada vez maior de geração e distribuição de energia elétrica no planeta. As nações buscam aumentar a capacidade de geração de energia, ao mesmo tempo em que se preocupam em reduzir seus custos e seus impactos ambientais decorrentes. A urgência na aplicação de medidas que possam desacelerar o avanço do aquecimento global é cada vez maior e espera-se que governos e interesses privados direcionem seus esforços na busca por soluções mais sustentáveis.

O Brasil, por possuir uma matriz de geração baseada em hidrelétricas, depende bastante da incidência de chuvas nas regiões dos reservatórios. Como pode ser visto na mídia<sup>1</sup>, a escassez de chuvas estão se tornando eventos cada vez mais frequentes, necessitando uma atenção especial para essa fragilidade nacional. Segundo o Balanço Energético Nacional (EPE, 2025), ano base 2024, 55,3% da energia elétrica brasileira foi produzida pelas hidrelétricas. De acordo com Lawson e Pereira (2017) o sistema hidrotérmico é o responsável pelo fornecimento da demanda despachável do país. Em períodos de estiagem, com a redução dos níveis dos reservatórios das hidrelétricas, muitas vezes torna-se necessário o acionamento das termoeletricas movidas a combustíveis fósseis (gás natural, óleo diesel e carvão) com a finalidade de suprir a demanda. Esse tipo de operação vai contra a meta de redução de carbono do setor de energia, além disso gera tarifas mais altas (WERNER e LAZARO, 2023).

---

<sup>1</sup> AGÊNCIA BRASIL. Estiagem faz governo acionar usinas termoeletricas em Rondônia. **Carta Capital**. 05 out, 2023. Economia. Disponível em <https://www.cartacapital.com.br/economia/estiagem-faz-governo-acionar-usinas-termoeletricas-em-rondonia/>. Acesso em: 25 out, 2023.

Há também a possibilidade de colapsos nos sistemas de geração centralizada (SGC), que podem ser causados em função da má manutenção do sistema ou até de eventos naturais que venham a danificar componentes e equipamentos. Dependendo da gravidade, os danos podem causar a interrupção de fornecimento de energia elétrica aos consumidores do sistema atingido. Segundo G1<sup>2</sup> em 3 de novembro de 2020, em virtude de um incêndio em um transformador, o estado do Amapá teve o fornecimento de energia interrompido para quase 90% de sua população (aproximadamente 765 mil pessoas), esta falta de fornecimento foi reestabelecida em sua totalidade somente após 22 dias. Durante todo este período a população enfrentou dificuldades de abastecimento de água, compra e armazenamento de alimentos, serviços de telefonia e internet, iluminação, ventilação, segurança, entre outras.

A geração descentralizada (GD) pode contribuir para reduzir o impacto desses possíveis apagões, pois as instalações ficam mais próximas dos consumidores que acabam dependendo menos dos SGC (FONSECA e CARVALHO, 2022). A GD pode aliviar os sistemas de difusão e transmissão, reduzir os investimentos, aumentar a versatilidade dos sistemas de transmissão (JANSEN e STEVELS, 2006), mitigar harmônicos (PEDERNEIRAS *et al.*, 2022) e reduzir as emissões de carbono (LIMA *et al.*, 2022).

Já em diversas comunidades situadas em localizações muito distantes dos grandes centros, uma das grandes dificuldades é conseguir a produção de eletricidade de forma isolada e independente. Segundo World Bank Group (2021) o número de pessoas sem acesso à energia elétrica no mundo era de 759 milhões em 2019. A eletrificação por meio de soluções descentralizadas de base renovável, vem ganhando impulso, sendo 11 milhões o número de pessoas conectadas a mini redes em 2019 (WORLD BANK GROUP, 2021). Na maioria destas localidades não se justifica a instalação das longas redes de transmissão dos sistemas centralizados e muitas vezes a geração de eletricidade acaba sendo realizada por geradores movidos a combustíveis fósseis. Devido às dificuldades logísticas de fornecimento de insumos para estas localidades, os preços dos combustíveis acabam se tornando alto, resultando em um grande aumento no custo da energia elétrica, sendo que a busca por novas formas de geração de energia pode ser uma solução.

---

<sup>2</sup> G1. Apagão no Amapá: veja a cronologia da crise de energia elétrica. **G1**. 18 nov, 2020. Amapá. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ap/amapa/noticia/2020/11/18/apagao-no-amapa-veja-a-cronologia-da-crise-de-energia-eletrica.ghml>>. Acesso em: 21 nov, 2023.

Os sistemas de colheita de energia podem capturar e converter pequenas quantidades de energia de várias fontes naturais. Existem várias referências aos processos de conversão envolvidos em sistemas de energia movidos a energia humana: colheita de energia, recuperação de energia, energia das pessoas e autoalimentação (JANSEN e STEVELS, 2006). Definições e questões críticas associadas aos sistemas de energia movidos a energia humana foram definidas por Jansen e Stevels (2006), que também observaram que a energia humana é “verde” de uma perspectiva científica (como os estudos de Avaliação do Ciclo de Vida, ACV, consideram não poluente) e da percepção do consumidor. Deve-se acrescentar uma ressalva deste autor que ela se torna “verde” pois já será gasta para realização de uma atividade com incrementos relacionados à saúde. A colheita de energia é baseada na ideia de que “[...] os dispositivos podem coletar a energia presente em seu ambiente em tempo real e usá-la imediatamente, de modo que a energia precise ser armazenada apenas temporariamente” (CHETTO e QUEUDET, 2016). A colheita de energia pode contribuir para compensar os crescentes desafios globais de energia sem incorrer no esgotamento de recursos energéticos adicionais, além de ajudar a mitigar as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Como mencionado por Beeby, Cao e Almussalam (2013), embora a colheita de energia seja idêntica aos sistemas de geração de energia renovável em larga escala, a quantidade de energia produzida é tipicamente de alguns watts, suficiente para fornecer uma alternativa ou, pelo menos, aumentar a energia das baterias. Para centros que participam do mercado livre, isso pode resultar numa redução de custos pela diminuição no pico de demanda. Atualmente, somente quem possui demanda superior a 500 kW pode participar do mercado livre. Segundo a Portaria 50/22 (BRASIL, 2022) a partir de 2024 esta participação será ampliada para todos os consumidores de alta tensão (valores superiores a 69 kV) e a previsão é de que a partir de 2028, também os consumidores residenciais possam participar deste mercado.

A energia cinética humana pode ser obtida a partir do exercício físico, a energia do pedal já foi mais utilizada como fonte de alimentação nas indústrias, mas com a chegada de sistemas de energia centralizados, muitos dos aparelhos que usavam a energia do pedal desapareceram - embora na década de 1970 alguns escritórios dos Estados Unidos ainda tivessem pequenos geradores de pedal como backup de energia, propostos por Veenman (2009). O termo “exercício verde” foi cunhado para se referir à energia utilizável produzida

por equipamentos de exercícios estacionários (máquinas elípticas, bicicletas e remo), que podem ser empregadas para carregar eletrônicos móveis. Ao realizar práticas esportivas *indoor*, geralmente, a energia gasta pelo praticante para realizar o exercício não é convertida em energia utilizável. No ciclismo *indoor* realizado em rolos ou em bicicletas ergométricas, por exemplo, a energia metabólica do atleta é transformada em calor e entalpia (suor), que o corpo transfere para o ambiente. Eventualmente, eles se tornam energia destruída externamente ao corpo (MADY *et al.*, 2013).

A prática regular de atividades físicas contribui em diversos aspectos, melhorando qualidade de vida, mantendo a capacidade funcional do indivíduo, regulando parâmetros de colesterol, glicemia, triglicerídeos, etc., consequentemente contribuindo para a redução do surgimento de DCNT (GUTHOLD *et al.*, 2018), estes benefícios já estão bem retratados na literatura, porém é muito importante atentar que quanto menos sedentária for a população, menores serão os gastos com saúde pública. Em função disto, as DCNTs tornaram-se prioridades em saúde devido ao seu impacto na morbimortalidade e nos custos decorrentes de assistência médica (MOREIRA *et al.*, 2017).

Quantificar a energia real gerada por uma pessoa através de atividades físicas é um fator crítico e com as preocupações ambientais cada vez maiores, também é fundamental determinar a diminuição associada nas emissões de GEE alcançada. Portanto, os benefícios da atividade física vão além dos ganhos individuais de saúde, estendendo-se ao setor de energia, meio ambiente e economia da saúde pública.

Este estudo relata o desenvolvimento do conceito do sistema *GREENER&HEALTHIER POWER*, um SCE a partir da prática do ciclismo *indoor*. Utilizando o formato de Fazenda de Colheita de Energia (FCE), vários SCEs podem ter suas produções de energia interligadas entre si, de forma que a toda a energia gerada possa ser coletada e fornecida à rede do sistema centralizado. Este conceito pode fornecer soluções para diversas situações, sendo aplicável a edifícios, empresas, academias, em pequenos espaços, como em casas e apartamentos e também em locais remotos.

### **1.1. Justificativa**

O SCE a partir da prática de ciclismo *indoor* pode proporcionar soluções para as diversas situações aqui abordadas (prédios comerciais e residenciais, academias de ginástica, dentre outros).

Este estudo busca desenvolver um equipamento que possa coletar a energia proveniente da realização de atividades físicas, que não estão sendo aproveitadas, e transformá-las em energia elétrica. Outro fator importante será a definição da quantidade de energia a ser gerada por um ser humano por vias da prática de atividades físicas e qual o valor da redução de emissões de carbono referentes a esta geração.

Levando-se em consideração os benefícios de ordem física, mental e social que a prática regular de atividades físicas pode trazer, será realizada uma análise econômica, considerando-se a inserção destes equipamentos em FCEs pelo setor público, buscando-se determinar o potencial de redução de custos.

Em suma, este projeto fornecerá condições de colher a energia que é dissipada na realização de exercícios físicos, contribuir para a redução nas emissões de carbono na geração de energia elétrica, contribuir para a melhoria da saúde da população e reduzir os gastos com Saúde Pública.

### **1.2. Inovação conceitual da proposta**

O sistema de geração apresentado neste trabalho, além do processo de geração convencionalmente utilizado em geradores deste tipo, possui como inovação conceitual a opção seleção da intensidade de esforço com que se realiza os exercícios. Durante a realização do exercício físico, por vias do aplicativo GHP, o SCE alterará automaticamente (de acordo com um circuito pré-selecionado pelo usuário) a intensidade de execução da atividade, desde um nível mais leve até um esforço maior. Quanto maior for o esforço escolhido durante a prática, maior será a quantidade de energia gerada. Este diferencial proporcionará a prática de exercícios de forma mais agradável, simulando situações mais próximas da realidade do ciclismo *outdoor*.

O aumento gradual do esforço pode simular uma inclinação cada vez maior de uma subida ou vice-versa. Geradores convencionais não apresentam esta opção, podendo resultar em falta de estímulo na prática do exercício devido a monotonia de execução.

O aplicativo GHP foi elaborado especificamente para o SCE deste estudo e pode ser instalado em celulares. Este aplicativo será responsável pela interface entre o sistema de geração e o usuário, que poderá selecionar diferentes tipos de treinos e durante a execução da prática de exercício, poderá monitorar parâmetros, a saber: velocidade, calorias, distância, energia gerada, emissões evitadas, dentre outros. Outro diferencial será a possibilidade de visualizar o quanto de energia elétrica ele produziu e o quanto emissões de gases do efeito estufa foram evitados em decorrência dos seus treinamentos.

O conjunto gerador desenvolvido neste trabalho tem potencial para ser adaptado a outros equipamentos de prática de atividades físicas, tais como o aparelho elíptico, o remo seco e o simulador de escadas.

O conceito de fazendas de colheita de energia (FCE) com a utilização do SCE desenvolvido neste trabalho, também será um conceito incremental a literatura, pois tem como proposta a colheita de energia elétrica, a melhoria da capacidade física da população e a economia de despesas médicas gerada devido a redução da incidência de DCNTs. Ademais, serão avaliados o comportamento termodinâmico do esportista durante a atividade, bem como efeitos de dietas, dentre outros na pegada de carbono. Em termos de geração, as FCEs possuem uma outra vantagem, pois é provável que sua capacidade de geração seja maior durante o horário de pico, que é quando a maioria dos trabalhadores saem do trabalho e vão praticar suas atividades físicas. Neste caso, FCEs on-grid contribuirão para fornecer energia exatamente no horário em que as redes de distribuição estão mais sobrecarregadas, podendo-se até evitar o uso de baterias de armazenamento. A Figura 1 apresenta o conceito de FCE com 32 unidades de SCE.

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre colheita de energia a partir da realização de atividades físicas, boa parte das publicações eram referentes a melhorias no conversor de frequência.

Blechmanm *et al* (2009) realizaram um estudo de um sistema de colheita para uma academia, contendo 45 bicicletas, que utilizadas durante um período de 18 horas diárias, seriam capazes de economizar US\$ 3.200 em um ano. Mustafi et al. (2017) analisaram um

sistema conjugado de musculação e ciclismo, com 62,5 e 83,6 W de potência, os sistemas apresentaram (com 12 h/dia de prática) uma geração de 273,75 e 366,16 kWh/ano e uma redução de 123,04 e 164,58 kg de CO<sub>2</sub> nas emissões anuais, respectivamente. Carbajales e Benjamin (2018) avaliaram a colheita de energia de 40 membros praticantes de remo seco e obtiveram uma produção anual de 447 kWh, porém o tempo de retorno de investimento ficou em 34 anos.

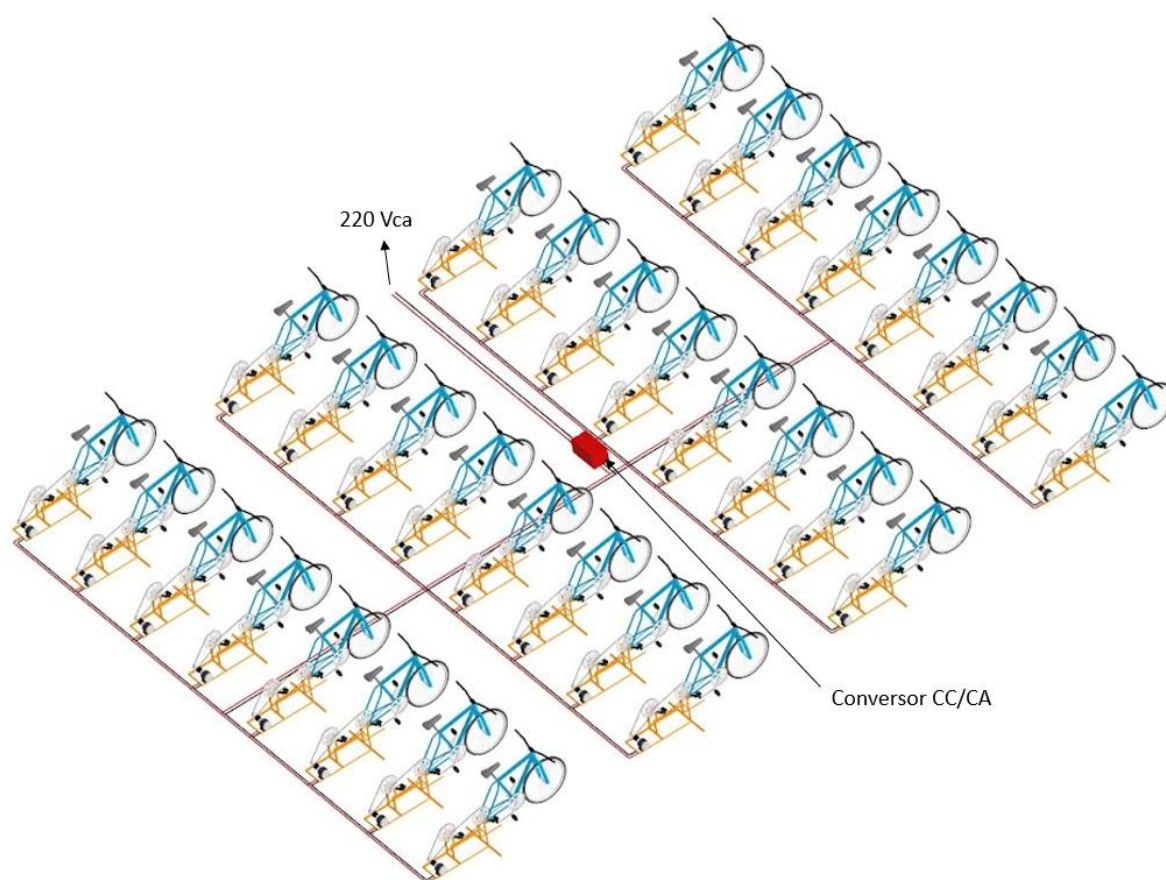


Figura 1 - Fazenda de Colheita de Energia (FCE)

Dentre todas as publicações pesquisadas nenhuma apresentou a opção de regulação de esforço automática durante a prática de exercícios com colheita de energia elétrica.

### 1.3. Objetivos

#### 1.3.1. Objetivo Geral

Desenvolver uma análise técnica e avaliar o desempenho termodinâmico, ambiental e social de FCEs, a partir do trabalho executado durante uma atividade física de ciclismo *indoor*.

#### 1.3.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do projeto são:

- i) Elaborar sistema gerador responsável pela colheita de eletricidade advindos dos movimentos realizados na prática de atividade de ciclismo *indoor* conforme demonstrado na Figura 2;
- ii) Determinar, com base nos resultados de testes experimentais, qual será a energia média produzida por um atleta amador que realize atividade física de ciclismo durante uma hora (2 treinos de 30 min);
- iii) Quantificar a energia elétrica anual que seria coletada em uma FCE pública;
- iv) Verificar o potencial de mitigação de mudanças climáticas associado à FCE, comparado ao *mix* brasileiro de energia elétrica;
- v) Analisar as emissões de GEE geradas pela variação da dieta dos praticantes;
- vi) Avaliar o potencial de redução de custos com Saúde Pública.

### 1.4. Contribuição

O equipamento desenvolvido neste trabalho contribuirá com benefícios na área energética, ambiental e de saúde pública.

A utilização do sistema de geração será capaz de coletar uma energia que está sendo dissipada, ao mesmo tempo em que trará benefícios à saúde de quem praticar a atividade física regular nele. A taxa de emissão de GEE (CO<sub>2</sub>-eq/kWh) do SCE é menor que a taxa do

*mix* brasileiro, o que contribui para a redução de emissões de CO<sub>2</sub>-eq. Com a prática de atividades no SCE, os usuários terão os benefícios que a prática regular de atividade física pode trazer à saúde, reduzindo a chance de contrair DCNTs, podendo resultar em redução de gastos com Saúde Pública.

Portanto, através da utilização do SCE, o usuário estará gerando energia elétrica, reduzindo a emissão de GEE, melhorando sua forma física e contribuindo para a diminuição de gastos com Saúde Pública.

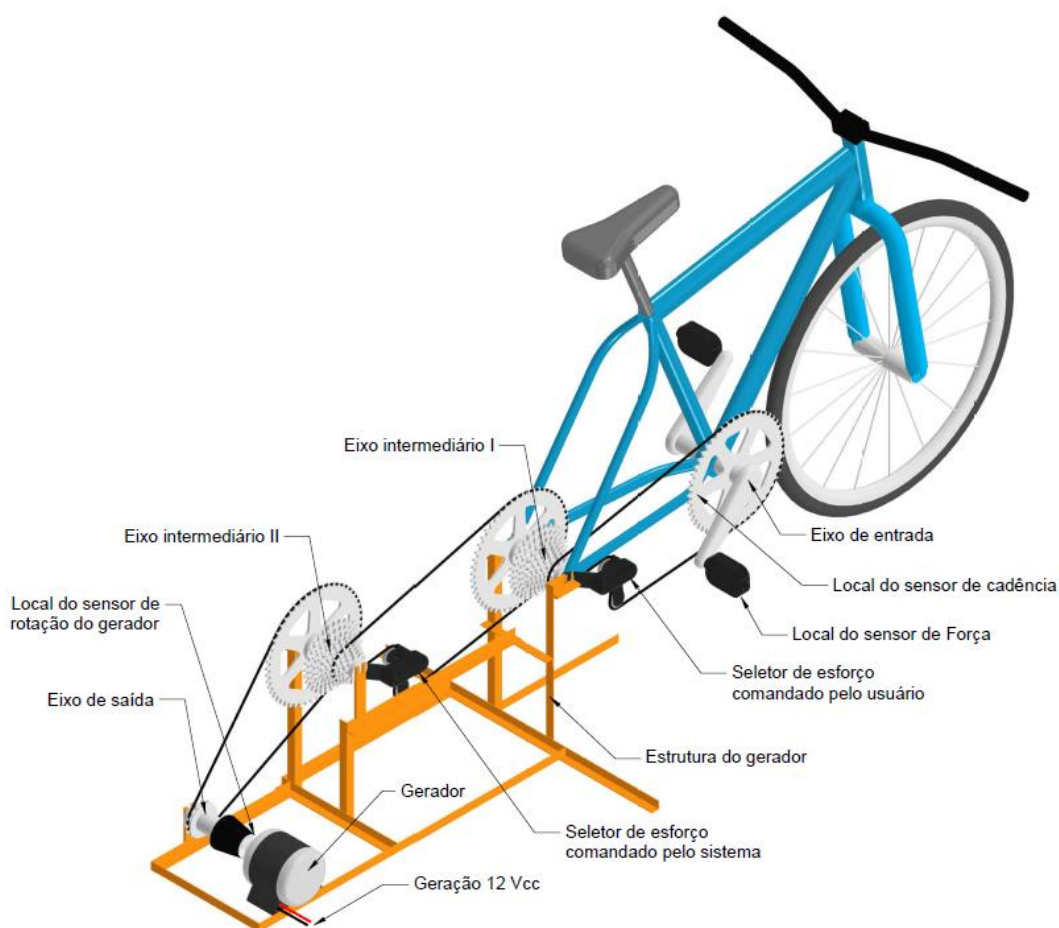


Figura 2 - Conjunto gerador de eletricidade a partir da prática de atividades físicas.  
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

## CAPÍTULO II – REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. Colheita de Energia (*Energy Harvesting*)

Enfrentando a crise energética mundial e o efeito estufa, os países em todo o mundo atribuem grande importância ao desenvolvimento da nova indústria energética. Sendo uma tecnologia promissora, a colheita de energia pode gerar energia limpa e renovável a partir do ambiente, capturando energia não utilizada e desperdiçada (PAN *et al.*, 2021). No ambiente que nos rodeia, podemos “colher” pequenas quantidades de energia dissipada e utilizá-la como energia elétrica disponível, essa tecnologia é conhecida como colheita de energia (AKINAGA, 2020).

A principal diferença entre colheita de energia e geração de energia é que a ação da qual a energia é coletada não é realizada com o único propósito de gerar energia, mas sim como um objetivo secundário (BLECHMAN *et al.*, 2009).

As tecnologias de colheita de energia podem ser subdivididas em quatro processos: (1) colheita de pequenas quantidades de energia no meio ambiente, (2) conversão da energia coletada em energia elétrica, (3) processamento da energia em circuitos de conversão de energia e (4) utilização da energia para detecção, processamento de informações e comunicação (AKINAGA, 2020). A Figura 3 demonstra de forma mais detalhada estes processos.

De acordo com a Figura 3, pode-se dizer que o sistema apresentado neste trabalho pertencerá a categoria de colheita de energia realizada a partir de movimento mecânico do pedal da bicicleta (fonte de energia), o qual será responsável por gerar uma frequência no gerador (tecnologia de colheita), que por indução eletromagnética será capaz de gerar tensão e corrente alternadas (conversão de energia) e posteriormente retificadas. Para que a energia produzida possa ser introduzida no SGC, a tensão e a corrente deverão ser convertidas para a forma alternada, sendo que a tensão ainda deverá ser elevada para o mesmo patamar da

tensão existente no SGC local (circuito de conversão de energia). Ao chegar ao local de consumo, a tensão deverá novamente ser reduzida e em muitos casos ainda terá que ser convertida novamente para forma contínua.

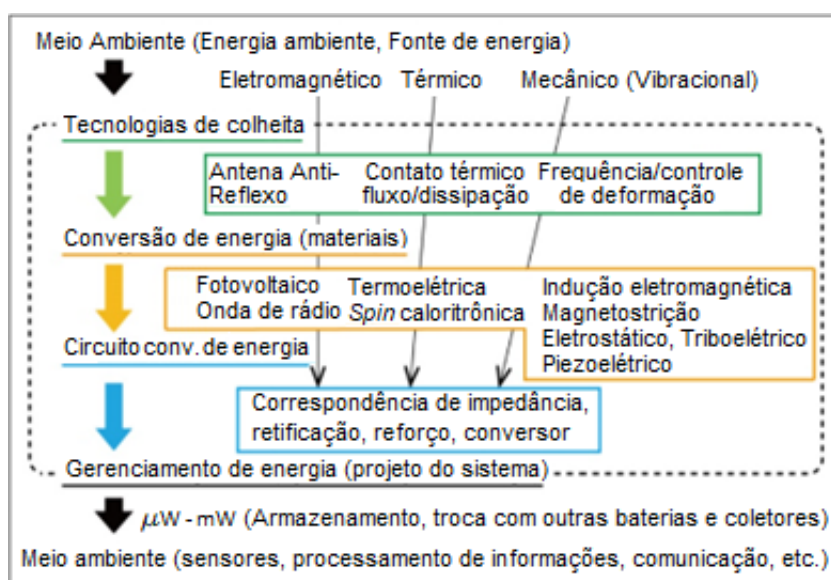


Figura 3 - Tecnologias de colheita de energia.

Fonte: Adaptado de Akinaga, 2020

A sequência de elevação e redução da tensão e também das conversões de forma contínua para alternada e vice-versa, acabam gerando um acúmulo de perdas em função da eficiência de conversão. Neste caso, um sistema com equipamentos consumidores alimentados por tensão e corrente contínuas e que estejam próximos ao local de geração, pode ser uma solução interessante, pois evita esta sucessão de conversões e longos trechos de transmissão. Por outro lado, proporcionalmente em relação a transmissão por corrente alternada, as perdas por transmissão em corrente contínua podem acabar sendo mais significativas e por este motivo deve-se evitar que seu consumo esteja muito distante da geração.

De cada batimento cardíaco, a cada passo, os seres humanos dissipam energia o continuamente, se esta energia puder ser aproveitada adequadamente, os benefícios são imensuráveis em termos da atual base populacional global (ZOU, BO e LI, 2021).

A colheita de energia a partir da prática de atividades físicas depende do tipo de exercício praticado e do preparo físico de quem pratica. Deve-se também salientar que a

duração da prática é um fator importante para o montante final da colheita de energia. A Tabela 1 apresenta a produção de energia para diferentes atividades.

Tabela 1 - Produção de energia para diferentes atividades (valores para homens).

<b>Fonte de energia (tempo de execução)</b>	<b>Potência (W)</b>
Ciclista profissional (1 hora)	400
Halterofilismo (poucos segundos)	6629
Velocistas 100 m (poucos segundos)	2392
Trabalhador (mais de 8 horas)	75
Um passo (menos de 1 segundo)	2-5

Fonte: Adaptado de Cicchella, 2023.

O ciclismo *indoor*, por exemplo é o tipo de atividade que tem grande potencial de colheita de energia, combinando potência e tempo de execução. Um ciclista com treinamento regular 2 a 3 vezes por semana tem uma potência máxima de 250-400 W, enquanto um ciclista de classe mundial gera até 600 W (JEUKENDRUP, CRAIG e HAWLEY, 2000). A produção de energia está diretamente ligada ao tempo de duração, foi demonstrado que ciclistas bem treinados sustentam mais de 50% de sua potência máxima por 1 hora (JEUKENDRUP, CRAIG e HAWLEY, 2000). Nota-se que como evidenciado por Mady et al. (2019) existe uma eficiência de conversão entre a potência metabólica e o que realmente vira potência útil.

Levando-se em consideração a porcentagem da população mundial que realiza exercícios físicos regularmente, os SCEs a partir da prática de atividades físicas podem adquirir um grande potencial de produção de energia elétrica. Neste sentido, o desenvolvimento e a difusão na utilização de equipamentos capazes de realizar esta colheita de energia torna-se de fundamental importância, visto que aproveita uma energia que normalmente já está sendo dissipada para o ambiente.

## 2.2. Geração de energia em comunidades isoladas (remotas)

Uma comunidade é considerada “remota” se não estiver conectada à infraestrutura de energia central, como uma rede elétrica regional ou um gasoduto de gás natural (BEKKER, 2021). Apesar de estarmos em pleno século XXI, infelizmente no mundo cerca de 660 milhões de pessoas ainda não têm acesso à eletricidade (ONU, 2023). Na Amazônia Legal, um total de 990.103 são os excluídos elétricos, dos quais são 212.791 moradores de assentamentos rurais, 78.388 indígenas, 59.106 habitantes de unidades de conservação (UCs) e 2.555 quilombolas (IEMA, 2021). A Figura 4 apresenta a distribuição das comunidades que não têm fornecimento de energia elétrica na região da Amazônia Legal.

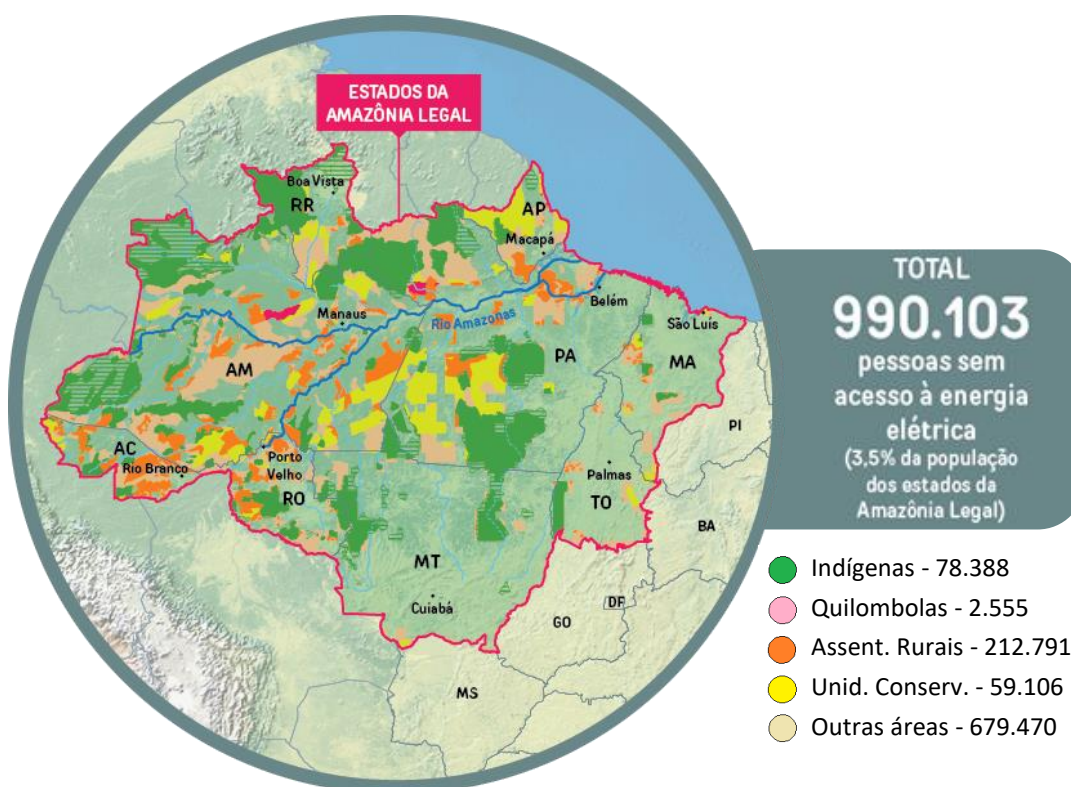


Figura 4 - População sem acesso à energia na Amazônia Legal  
Fonte: Adaptado de IEMA, 2021

Por não terem acesso ao SGC, as comunidades isoladas são obrigadas a gerar sua própria energia. Normalmente, esta eletricidade é obtida através de geradores a óleo diesel. A Região Norte do Brasil tem uma forte participação de geração elétrica com combustíveis

fósseis, onde aproximadamente 95% da geração se dá com fonte fósseis. O diesel tem forte participação na geração de eletricidade em comunidades isoladas, compondo cerca de 80% do consumo de combustível desses locais (RENÓ *et al.*, 2021).

Comunidades isoladas geralmente possuem dificuldade de acesso e consequentemente os custos adicionais de transporte acabam encarecendo o fornecimento de produtos. Para Khodayar (2017) as comunidades isoladas se deparam com o alto custo do óleo diesel e a volatilidade do preço do combustível, além da incerteza de sua disponibilidade devido aos impedimentos no transporte. Outro fator importante a ser considerado é a manutenção dos geradores que, devido à dificuldade de acesso, acaba sendo mais cara e por muitas vezes mais demorada, em função de fornecimento de peças e de mão-de-obra especializada. Pimentel e Rosas (2020) estimaram o custo anual de operação e manutenção de um gerador diesel de 10 kW em R\$ 9.186,71.

O número de pessoas sem acesso à eletricidade só não é maior graças aos 212 Sistemas Isolados (SI) presentes em 7 estados brasileiros (EPE, 2022). Sistemas Isolados são sistemas elétricos de serviço público de distribuição de energia elétrica que, em sua configuração normal, não estejam eletricamente conectados ao Sistema Interligado Nacional (SIN) por razões técnicas ou econômicas, conforme define o Decreto n. 7.246/2010. A Figura 5 apresenta a abrangência dos SIs no Brasil, tendo uma população total atendida de 3,1 milhões de habitantes, com uma variação que vai de 15 habitantes (Maici – RO) a 436.500 habitantes (Boa Vista – RR).

A previsão de geração para os SIs em 2024 é de 3,67 TWh, dos quais 58,3 % são gerados a partir do diesel e 20,9% a partir do gás natural. Somados, estes dois combustíveis são responsáveis por 99,8% das emissões de GEE destes sistemas (EPE, 2022). Segundo ANEEL (2022), o orçamento 2023 previsto para a Conta de Consumo de Combustível (CCC), fundo nacional de subsídios à geração de energia em SI, é de cerca de R\$ 12 bilhões. Os valores altos do combustível e dos níveis de emissão de GEE, sugerem que seja incentivada cada vez mais a instalação de sistemas de geração de energias renováveis. O investimento em SCE pode ser mais favorável quando instalados em comunidades remotas se comparados aos sistemas de geração a combustíveis fósseis, segundo Khodayar (2017) o custo mais alto de instalação de recursos de geração renováveis é justificado quando o custo

do combustível diesel for significativamente alto ou o fornecimento de combustível for limitado devido a questões logísticas.

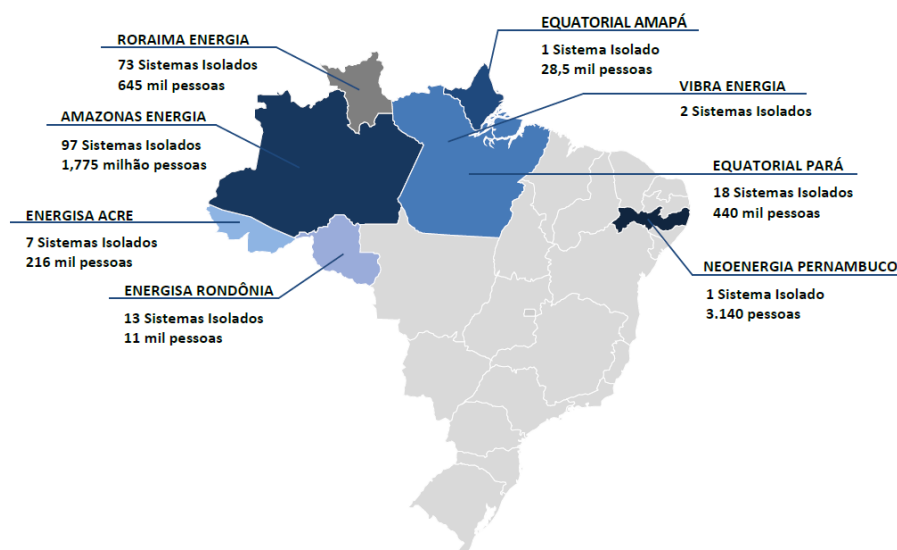


Figura 5 - Sistemas Isolados – Ciclo 2022.  
Fonte: Adaptado de EPE, 2022

### 2.3. Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)

Nesta era moderna, a produção de energia é parte integrante de qualquer economia. O aumento incessante da demanda energética e o conseqüente aumento do uso de combustíveis fósseis convencionais para atender às demandas energéticas tem efeitos devastadores no aquecimento global e na poluição ambiental (SIDDIQUI e DINCER, 2017). A humanidade está cada vez mais preocupada com a questão das emissões de poluentes geradas na cadeia produtiva (produtos e serviços). Uma das alternativas para esta questão é buscar por processos e produtos que atendam às demandas técnico-econômicas e que emitam uma menor quantidade de poluentes possível durante toda trajetória de seu ciclo de vida.

Segundo Yan (2015) a ACV é um processo utilizado para avaliar os encargos ambientais associados a um produto, processo ou atividade, de forma a: (i) identificar a energia, os materiais utilizados e também os resíduos liberados para o meio ambiente e (ii) quantificar os itens identificados; (ii) avaliar o impacto dessas energias e materiais utilizados

e as liberações ao meio ambiente; (iii) identificar e avaliar oportunidades que possam resultar em melhorias ambientais. A avaliação pode incluir totalmente ou parcialmente o ciclo de vida do produto e abrange: extração e processando matérias-primas; fabricação, transporte e distribuição; uso e reutilização; manutenção; reciclagem e disposição final. Outro aspecto importante da ACV é que ela permite que sejam verificadas quais são as fases do ciclo de vida que possuem maior carga de contribuição para o impacto ambiental.

Para Choi, Friley e Alfstad (2012), a ACV é o método mais aceito, na maior parte dos casos, para avaliar o desempenho ambiental de determinado processo ou produto. Segundo a ABNT NBR ISO 14040 (2014a) os estudos de ACV compreendem as seguintes fases:

- Definição de objetivo e escopo: nesta fase define-se o sistema e as funções do produto a ser estudado, a unidade funcional, a fronteira do sistema, as categorias de impacto e metodologia para avaliação, pressupostos, limitações, etc.

- Análise de inventário: envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas relevantes de um sistema de produto, é um processo iterativo, pois à medida que se amplia o conhecimento sobre o sistema, pode ser que sejam alteradas as fronteiras do sistema ou surjam novos elementos resultado de refinamento das informações.

- Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV): a partir do inventário os dados são identificados e em seguida associados a categorias de impacto específicas. A fase de AICV também fornece informações para a fase de interpretação do ciclo de vida.

- Interpretação: esta é a fase em que as constatações da análise de inventário e da avaliação de impacto são consideradas em conjunto. Convém que esta fase forneça resultados que sejam consistentes com o objetivo e escopo definidos e que levem a conclusões, expliquem limitações e provejam recomendações.

A Figura 6 demonstra as fases da ACV e suas interações, sendo importante salientar que estas etapas trabalham de forma interativa. Os elementos de saída alimentam a próxima etapa e também podem servir para alimentar uma etapa anterior. Esta retroalimentação se torna um processo de refinamento dos dados, contribuindo para que sua qualidade e a precisão se tornem cada vez maior. A Figura 7 demonstra os processos de refinamento e retroalimentação de forma interativa.

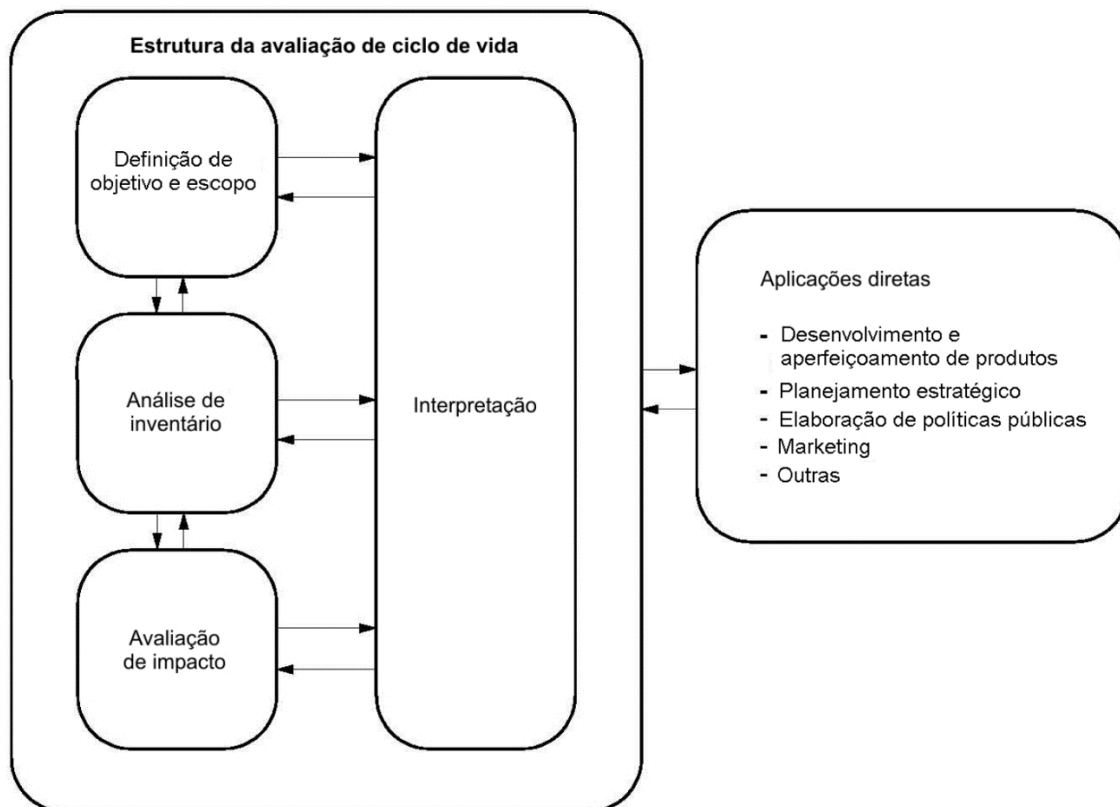


Figura 6 - Fases de uma ACV.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR ISO 14040, 2014a.

A norma ABNT NBR ISO 14044 (2014b) é a responsável por especificar os requisitos e prover as orientações para a avaliação do ciclo de vida acima descrito. A norma ABNT NBR ISO 14071 (2018) trata dos processos de análise crítica e competências do analista, fornecendo requisitos adicionais e diretrizes à ABNT NBR ISO 14044 (2014b).

Segundo Treyer, Bauer e Simons (2014) somente a metodologia de ACV permite uma avaliação comparativa abrangente e equilibrada das tecnologias de geração de energia, apresentando elementos essenciais no “perfil de pontos fortes e fracos” das diferentes tecnologias e servindo de apoio para decisões sobre desenvolvimento sustentável e diretrizes políticas.

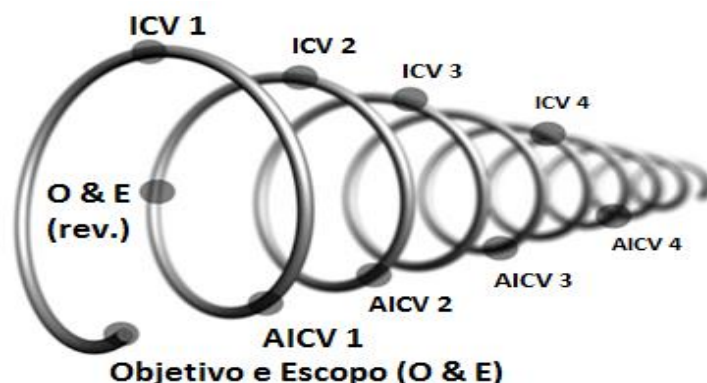


Figura 7 - Processo de Refinamento das Informações.  
 Fonte: Adaptado de Hauschild *et al.*, 2013.

#### 2.4. Prática de Atividades Físicas e seus Benefícios

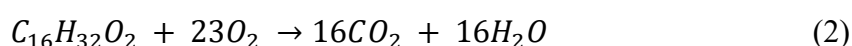
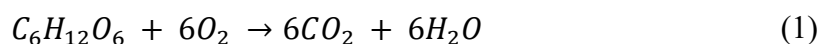
Esta seção tem como principal finalidade avaliar a colheita da energia que não está sendo aproveitada durante a realização da prática esportiva de ciclismo *indoor*. Para tanto, torna-se necessária uma análise do processo de produção de energia do corpo humano, este tipo de análise é normalmente encontrada na literatura para obtenção de condições de conforto térmico (RIBEIRO e MADY, 2022 ; MOLLIET e MADY, 2021), patologias e indicadores de saúde (ALVES e MADY, 2020), e indicadores de prática esportiva e desempenho durante exercícios (MADY *et al.*, 2019). Existem até artigos de revisão sobre esse assunto (OZILGEN, 2017; DUTTA e CHATTOPADHYAY, 2021).

Normalmente, na literatura, existe uma abordagem termodinâmica em relação à eficiência metabólica do ponto de vista da primeira e da segunda lei (ANNAMALAI e NANDA, 2017). Há uma clara distinção da primeira lei, a energia liberada pela oxidação dos nutrientes no corpo humano, ou metabolismo ( $M$ ), é convertida em trabalho ( $W$ ) e calor ( $Q_M$ ) (Figura 8). Para esse caminho, parte da energia é utilizada nas moléculas de Adenosina Trifosfato (ATP) como a “moeda energética do corpo humano” (MADY e OLIVEIRA, 2013). Contudo, não podemos afirmar se existe um limite para a conversão do metabolismo em trabalho.



Figura 8 - Diagrama de Sankey do processo de conversão de energia humana.

As Equações de (1) a (3) mostram as reações de oxidação dos nutrientes mais típicos do corpo humano. Sendo a glicose a mais comum para exercícios aeróbicos ( $C_6H_{12}O_6$ ) na Equação 1. As reações dos ácidos graxos representadas pelo ácido palmítico também são utilizadas para atividade física. Contudo, a uma taxa mais baixa, o coeficiente respiratório é geralmente 1 (relação entre os moles de consumo de oxigênio e a produção de dióxido de carbono).



No entanto, uma reação completa de oxidação destes nutrientes seria impossível de controlar; é por isso que a degradação dos nutrientes é lentamente oxidada nas mitocôndrias, utilizando as moléculas de Trifosfato de Adenosina (ATP) e Difosfato de Adenosina (ADP) como transportadores de energia. A Equação (4) mostra a formação de ATP a partir da exergia dos nutrientes. O inverso é a hidrólise do ATP, que é o trabalho máximo disponível no corpo e apenas computado pela segunda lei da termodinâmica (variação da energia livre de Gibbs da reação nas condições naturais do corpo). A mudança de energia livre de formação de ATP ( $\Delta g_{ATP}$ ) na Eq. (4) é 56 kJ/mol, e na hidrólise, -56 kJ/mol (MADY e OLIVEIRA, 2013).



A Figura 9 mostra as três etapas do trabalho produzido no corpo humano. Primeiro, é a degradação dos nutrientes dentro das mitocôndrias, que é o trabalho máximo disponível para o corpo ( $B_M$ ); a segunda etapa é a produção de ATP ( $W_{MAX}$ ) com exergia destruída ( $B_{d,ATP}$ ) e transferência de exergia para o corpo na forma de calor ( $B_{QM,ATP}$ ). A última etapa é a conversão do ATP (variação de Gibbs da reação de oxidação do nutriente), com a exergia destruída ( $B_{d,r}$ ) e a transferência de exergia para o corpo ( $B_{QM,r}$ ). Lembrando que a exergia total na forma de calor é  $B_{QM} = B_{QM,ATP} + B_{QM,r}$  e a exergia total destruída é  $B_d = B_{d,ATP} + B_{d,r}$ . Portanto, a eficiência metabólica é a razão entre  $W_{MAX}$  e  $B_M$  e a eficiência corporal é a razão entre o trabalho realizado  $W$  e  $B_M$ .

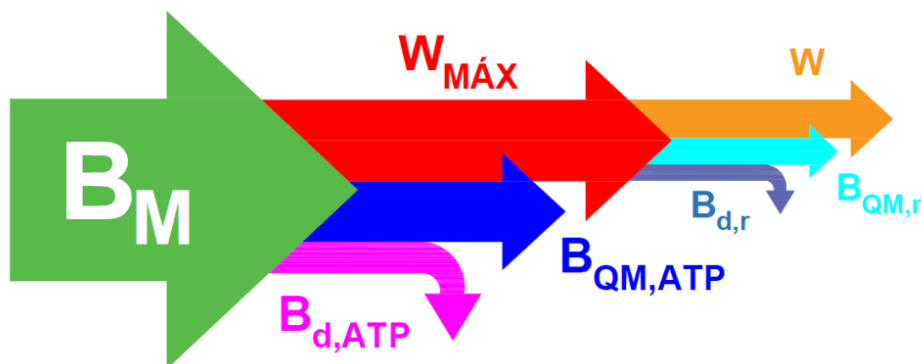


Figura 9 - Diagrama de Grassmann do trabalho produzido pelo corpo humano a partir dos nutrientes disponíveis na energia.

Porém, do ponto de vista exergético, existem algumas etapas referentes ao trabalho máximo disponível: a variação da energia livre de Gibbs da reação de oxidação dos nutrientes. O metabolismo exergético  $B_M$  é o trabalho máximo que o corpo teria disponível. Ainda, há uma etapa intermediária: a formação do ATP a partir de ADP e  $P_i$  (íons fosfato) para obter as necessidades de exergia para qualquer atividade. Portanto, é uma irreversibilidade intrínseca do corpo humano. A primeira lei não pode afirmar qual parte do metabolismo é perdida na forma de calor ou usada para obter ATP (ANNAMALAI e NANDA, 2017; MADY e OLIVEIRA, 2013). Eventualmente, a segunda lei é uma

ferramenta útil para passar desta etapa à eficiência exergetica global, servindo de ponto de vista para diversos exercícios, como levantamento de peso (SPANGHERO *et al.*, 2018), teste de esforço em esteira (MADY *et al.*, 2013) e bicicleta ergométrica (MADY *et al.*, 2019). Esta última é a medição mais direta, pois a potência obtida do equipamento é a definição termodinâmica de trabalho (IGARASHI *et al.*, 2022). A eficiência variou de 23 a 28% para os testes realizados por (MADY *et al.*, 2019), inferior ao trabalho máximo (como deveria). A Figura 10 representa um teste ergométrico (MADY *et al.*, 2019) mostrando a transferência de energia para o ambiente, a medição do metabolismo por calorimetria indireta (MADY e OLIVEIRA, 2013) e o trabalho realizado ao sair da bicicleta (MADY *et al.*, 2019).

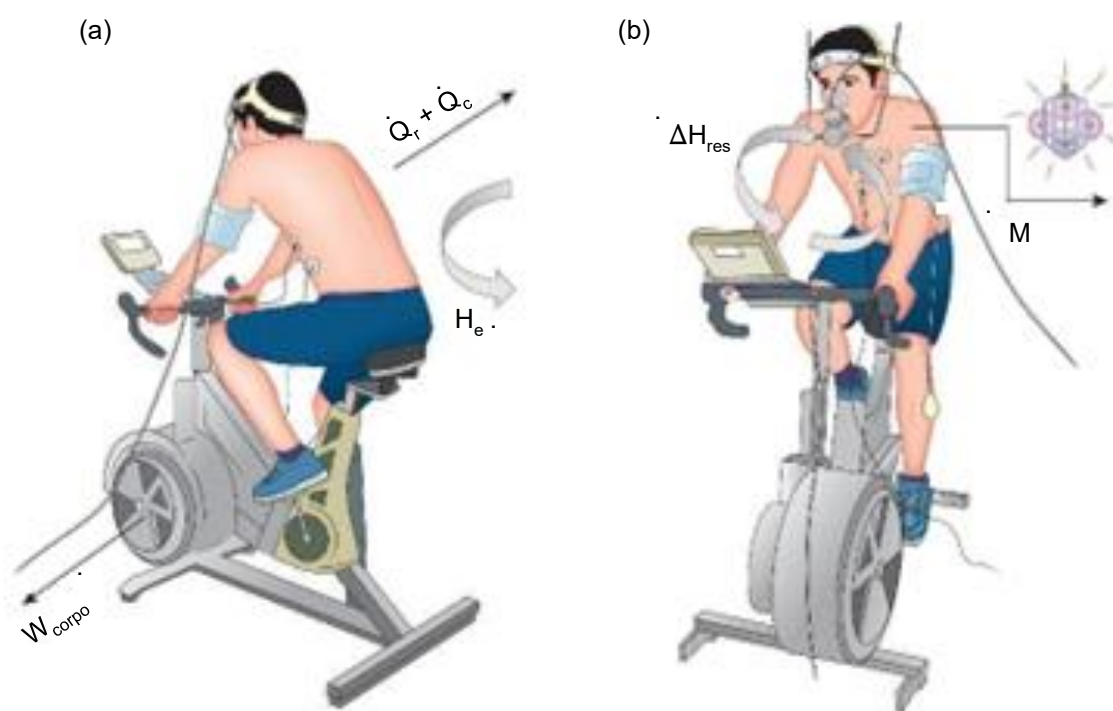


Figura 10 - Esquema de um teste ergométrico, com fluxos de energia. O trabalho que sai do sistema humano é a energia aqui colhida.

Fonte: Adaptado de MADY *et al.*, 2019

A Tabela 2 apresenta a eficiência de conversão e metabolismo do ser humano durante a realização de atividade física.

Tabela 2 - Potência da atividade física do ser humano.

<b>Ser Humano</b>	
Eficiência de Conversão	30 %
Metabolismo na Atividade	400 W
Potência	120 W
PCI (Glicose - Hayne (2008))	15600 kJ/kg, J/g
Massa de Glicose Consumida	0,0256 g/s
Massa de CO <sub>2</sub> produzido	0,0063 g/s

Fonte: Adaptado de Spanghero *et al.*, 2018

No entanto, não basta compreender de onde vem a energia, a população deve ter mais consciência de que a prática regular de atividades físicas pode trazer grandes benefícios para a saúde. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2010), cabe aos governantes a implementação de diretrizes nacionais sobre atividade física para a saúde, incentivando e colocando em prática políticas e intervenções que garantam acesso e espaço para a realização de atividades físicas. A prática de atividade física regular reduz o risco de doença cardíaca coronária e acidente vascular cerebral, diabetes, hipertensão, câncer de cólon, câncer de mama e depressão, sendo também um determinante chave do gasto de energia e, portanto, fundamental para o equilíbrio de energia e controle de peso (OMS, 2009). Embora um aumento na expectativa de vida não conduza automaticamente a uma redução nos custos de saúde associados, a diminuição da morbidade durante esses anos adicionais pode levar a uma diminuição nos custos globais de saúde (HASKELL, BLAIR e HILL, 2009).

A prática insuficiente de atividade física constitui um dos principais fatores de risco modificável para as DCNTs, reduz a expectativa de vida e afeta negativamente a saúde mental e a qualidade de vida (GUTHOLD et al., 2018). As DCNTs têm chamado atenção nos últimos anos: em 2016 foram responsáveis por aproximadamente 71% das mortes em âmbito mundial (OMS, 2018). Dentre as DCNTs, destacam-se as doenças cardiovasculares (DCV), representando 44% dos óbitos por DCNT no mesmo ano, de acordo (OMS, 2018).

Os benefícios que a prática regular de atividades físicas traz à saúde, bem como a prevenção de DCNTs já estão bem retratadas na literatura, porém é muito importante atentar que quanto menos sedentária for a população, menores serão os gastos com saúde pública.

Em função disto, as DCNTs tornaram-se prioridades em saúde devido ao seu impacto na morbimortalidade e nos custos decorrentes de assistência médica (MOREIRA et al., 2017).

A prática de colheita de energia a partir da realização de atividades físicas contribui para a melhoria na qualidade de vida da população, podendo também contribuir para a redução de gastos com Saúde Pública em decorrência da redução das DCNTs.

#### **2.4.1. O Impacto de Bicicletas Estacionárias Geradoras de Energia na Saúde Cardiovascular dos Praticantes**

A prática de atividades, como o ciclismo *indoor*, pode ser uma estratégia eficaz para fortalecer a saúde cardiovascular, mitigando simultaneamente os impactos ambientais (CHAVARRIAS et al., 2019). Essa modalidade pode permitir a realização segura e monitorada de exercícios aeróbicos, independentemente das condições climáticas ou da disponibilidade de espaços externos. Além disso, o uso de bicicletas integradas a sistemas de colheita de energia contribui para a redução da dependência de fontes não renováveis, promovendo um modelo de atividade física sustentável. No entanto, grande parte da literatura disponível permanece focada em parâmetros fisiológicos isolados, como aptidão cardiorrespiratória e composição corporal, sem abordar adequadamente a interface integrada entre a saúde humana e o meio ambiente (ADISASMITO et al., 2022)

Dado esse contexto, é essencial conduzir estudos abrangentes e metodologicamente rigorosos que investiguem os efeitos de programas de ciclismo *indoor* sobre parâmetros cardiovasculares, incorporando uma perspectiva que vá além dos benefícios individuais. A consideração simultânea dos impactos ambientais (por exemplo, redução do consumo de fontes de energia não renováveis) e dos aspectos sociais relacionados à prática de atividades em ambientes coletivos permite uma compreensão mais integrada da intervenção. Essa abordagem holística, fundamentada nos princípios do conceito de Uma Só Saúde, pode fornecer evidências científicas consistentes para apoiar o desenvolvimento de políticas públicas, estratégias de promoção da saúde e programas de prevenção de doenças cardiovasculares, além de contribuir para o fortalecimento de comunidades urbanas mais sustentáveis (ADISASMITO et al., 2022).

Diante do exposto, é imperativo adotar estratégias inovadoras e integradas que promovam impactos positivos na qualidade de vida humana, alinhando-se à sustentabilidade

ambiental. Assim, será apresentado no item 3.7 deste trabalho um protocolo de intervenção que visa preencher lacunas no conhecimento científico, analisando os efeitos de um programa de ciclismo *indoor* sobre indicadores cardiovasculares em adultos sedentários. A justificativa deste estudo, que já está em fase de implementação, reside na necessidade de produzir evidências sobre o potencial dessa modalidade.

## 2.5. Estado da Arte

Desenvolver um sistema que seja capaz de coletar a energia, que todos os dias está sendo desperdiçada durante a prática de *spinning* e ciclismo *indoor*, por milhões de praticantes espalhados pelo globo terrestre, justamente num momento de busca por novas formas de geração. A prática de atividades físicas, o incentivo pela melhoria da qualidade de vida da população com consequente redução de gastos com saúde pública e possibilidade de geração de uma energia menos poluente, são preocupações que a humanidade vem buscando constantemente.

Com foco na autogeração de eletricidade para consumo interno ou exportação para a rede elétrica em academias, Fahmy e Yildiz (2009) apresentaram um SCE usando energia cinética humana baseado nos sistemas de bicicletas ergométricas. Os resultados indicaram que uma rotina regular de exercícios de uma pessoa era suficiente para alimentar o monitor da bicicleta (prolongando a vida útil da bateria) e um pequeno rádio de 40 mW. O estudo verificou que a energia CC (corrente contínua) da bicicleta fitness também pode ser usada para diferentes aplicações como por exemplo em aparelhos CA (corrente alternada), usando um inversor CC-CA conectado a uma unidade de armazenamento). Sukumaran e Purushothaman (2014) desenvolveram um equipamento de colheita de energia baseado no exercício de mergulho, capaz de gerar 10 W, os autores mencionaram que se 5% da população indiana em idade ativa utilizar o equipamento por 1 hora por dia, 375 MW /dia é gerado. Ullah *et al.* (2015) focaram na geração de energia em larga escala a partir de bicicletas ergométricas e verificou a probabilidade comercial como fonte de energia secundária em academias locais de Bangladesh. Embora a eficiência de conversão tenha ficado abaixo de 50%, foi possível carregar uma bateria de 12 V, 55 Ah com baixo custo e segurança. Também em Bangladesh, Hossain et al. (2016) obtiveram uma eficiência de quase 60% e a eletricidade gerada foi considerada uma alternativa à rede elétrica durante o

corte de carga. Mais recentemente, Ihsan e Viswanathan (2019) observaram que uma redução de aproximadamente 20% dos custos de energia de uma academia poderia ser obtida com um arranjo de baixo custo para coletar energia de bicicletas estáticas. Pham *et al.* (2022) focaram em uma aplicação residencial para uma bicicleta de *spinning* regenerativa, com um preço-alvo definido em \$ 400 (em comparação com as opções disponíveis comercialmente em \$ 3.000).

Para Warongkidh (2017), a geração de energia humana com bicicleta ergométrica torna-se viável, se sua potência de saída for enviada para um SGC, sem sistema de armazenamento de energia e com baixas perdas na transmissão, o que reforça o conceito das FCEs. Pham *et al.* (2022) também sugeriram a interligação de bicicletas geradoras ao SGC. O experimento levou a conclusão de que cinco bicicletas geradoras, a uma velocidade média de 20 km/h, durante 6 horas por dia, poderiam produzir 1,5 kWh de energia elétrica e poderiam ser capazes de cobrir cerca de 45% de todo o consumo de energia de academias de ginástica de tamanho médio.

Haji, Lau e Agogino (2010) realizaram uma ACV em 28 máquinas elípticas adaptadas para a colheita de energia e estimaram, para o campus da Universidade da Califórnia (Berkeley), a redução das emissões médias anuais de CO<sub>2</sub> em aproximadamente 3,7 toneladas. Barois, Caverly e Marshall (2010) também avaliaram a colheita em máquinas elípticas e concluíram que a utilização de 1 máquina, 8 horas por dia, seria capaz de produzir 1,2 kWh, o que pouparia 0,2 kg de CO<sub>2</sub>/dia e resultaria num equivalente de 730 kg de CO<sub>2</sub> ao longo de toda sua vida útil.

Lee *et al.* (2012) avaliaram os efeitos da inatividade física na carga de DCNTs no mundo e encontraram a taxas de 7,0% da carga de doença para diabetes tipo 2, aproximadamente 6,0% para doença coronariana, 10,0% para câncer de mama e 10,0% para câncer de colo. O mesmo estudo encontrou que mais de 533 mil ou 1,3 milhão de mortes poderiam ser evitadas caso a inatividade física diminuísse em 10,0% ou 25,0%, respectivamente. Segundo Moreira *et al.* (2017) em 2013 foram realizadas 974.641 internações hospitalares devido às doenças crônicas avaliadas em adultos com idade igual ou superior a 40 anos no Brasil, gerando um custo de R\$ 1.849 milhões (US\$695,6 milhões) para o Sistema Único de Saúde (SUS). Deste total 15,0% foram atribuídas à inatividade física, resultando em um custo total estimado em R\$ 276 milhões (US\$ 104,3 milhões).

Siqueira, de Siqueira-Filho e Land (2017) avaliaram os custos totais estimados especificamente para doenças cardiovasculares no Brasil, em 2015 os custos totais superaram os R\$ 37,1 bilhões. Foram inclusos nos estudo os custos diretos, reembolso ANS, custo da morbidade, custo da mortalidade, custo aposentadorias e auxílios e custo medicamentos. Uma boa parcela deste montante poderia ser reduzida com a prevenção de doenças a partir da prática de atividades físicas.

## CAPÍTULO III – MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1. Volume de controle macro

Com a finalidade de apresentar todos os aspectos aqui analisados, a Figura 11 apresenta um esquema que demonstra as entradas, os processamentos e as saídas envolvidas neste trabalho.

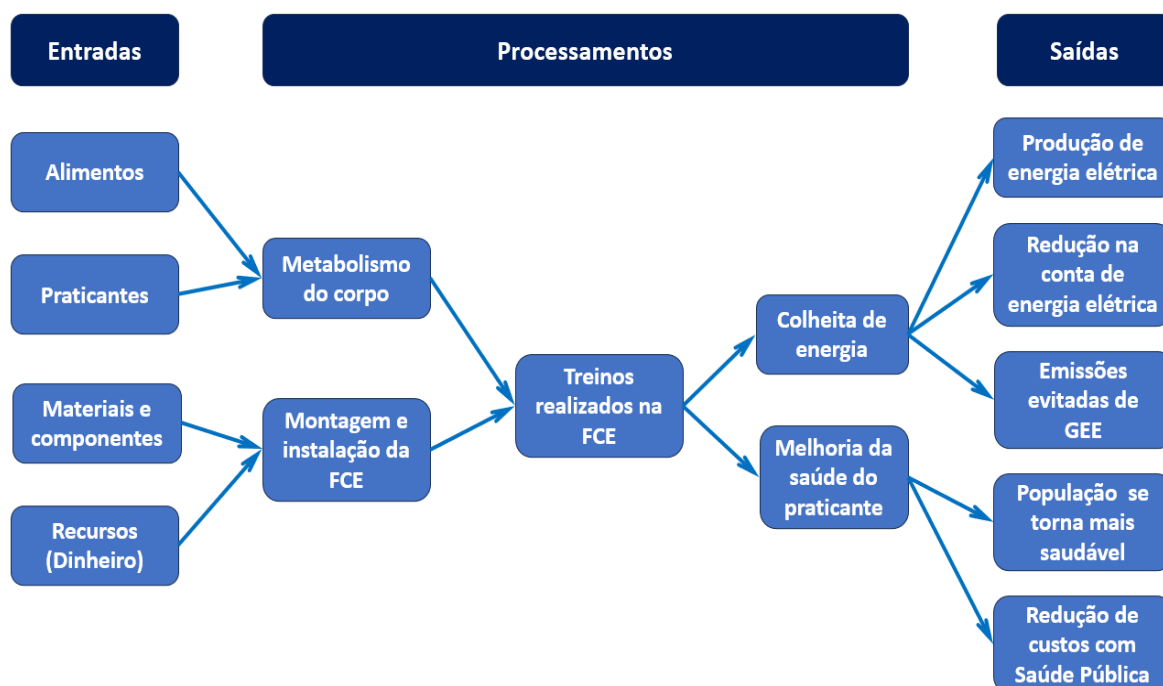


Figura 11 - Volume de controle macro

Um dos principais objetivos deste trabalho é criar uma FCE que atenda a população e propicie condições da prática de ciclismo *indoor* regularmente, representado pelo retângulo “Treinos realizados na FCE” localizado no centro do esquema.

Para que as pessoas possam realizar as práticas nas FCEs, será necessária a existência de “Praticantes”, teoricamente bem “Alimentados”, para que através do seu esforço físico e da energia vinda dos alimentos (“Metabolismo”), possam acionar os pedais do sistema GHP.

Por outro lado, serão necessários “Materiais e componentes” e “Dinheiro” para que ocorra a “Montagem e instalação da FCE”.

Ao realizar a atividade física, parte da energia utilizada, é aproveitada pela “Colheita de energia”. A realização de prática regular das atividades físicas (150 min/semana) resultará em “Melhoria da saúde do praticante”.

Ao final, os processos entregarão os seguintes itens como produtos de saída:

- A “Produção de energia elétrica” que será resultado da colheita de energia realizada pelo GHP durante a prática da atividade física;

- A “Redução da conta de energia elétrica”, pois a energia coletada poderá ser imediatamente utilizada ou fornecida para a rede, em ambos os casos isso representará a um abatimento no total de energia consumido;

- As “Emissões evitadas de GEE”, é o resultado da diferença entre a taxa de emissões do *mix* Brasil e da FCE. Neste estudo esta diferença foi favorável e proporcionará redução nas emissões a cada kWh coletado;

- Com a prática regular de atividades físicas na FCE, a “População se torna mais saudável”;

- A melhoria da saúde da população resultará em “Redução de custos com saúde pública”.

### **3.2. O fluxograma de determinação dos parâmetros ambiental e de energia**

**A Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta um fluxograma contendo as principais variáveis a serem determinadas neste estudo.

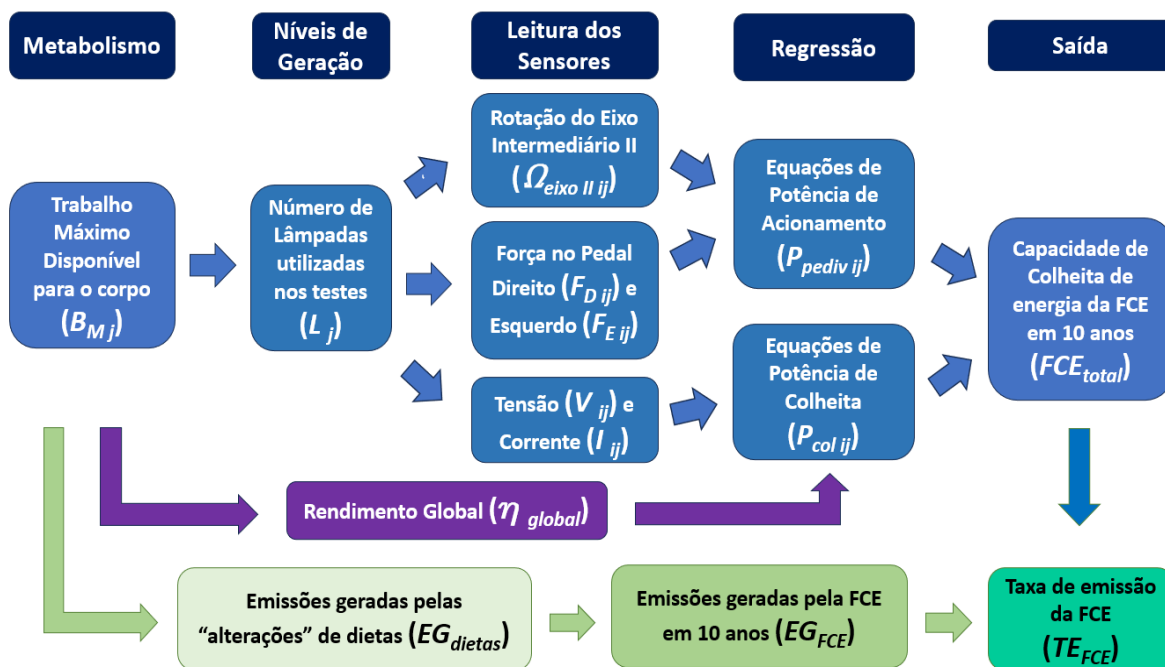


Figura 12 - Fluxo com os parâmetros a serem calculados

A Taxa de Emissão da FCE ( $TE_{FCE}$ ) é a principal variável de saída e dependerá da determinação da quantidade de energia produzida por uma FCE em 10 anos ( $FCE_{total}$ ) e das emissões de GEE geradas por uma FCE ( $EG_{FCE}$ ) durante toda a sua vida útil (10 anos).

Portanto, a sequência deste estudo será dividida nas seguintes etapas: Geração de Energia (em azul) e Análise Ambiental (em verde), a Tabela 3 apresenta um resumo com a sequência de cálculo que será realizada.

Tabela 3 - Sequência de cálculo das variáveis

<b>Passo</b>	<b>Procedimento</b>	<b>Variáveis</b>
1	Medir força nos pedais	$F_D$ e $F_E$
2	Calcular força total e força resultante	$F_{total}$ e $F_{result}$
3	Calcular torque no pedivela	$Tq_{pediv}$
4	Medir rotação no eixo intermediário II	$\Omega_{eixo II}$
5	Calcular rotação no pedivela e rotação no alternador	$\Omega_{pediv}$ e $\Omega_{alt}$
6	Calcular potência no pedivela	$P_{pediv}$
7	Calcular energia no pedivela	$E_{pediv}$
8	Medir corrente e tensão	$I$ e $V$
9	Calcular potência coletada	$P_{col}$
10	Calcular energia coletada	$E_{col}$
11	Definir níveis de treino	$NIV_{treino}$
12	Calcular o trabalho máximo disponível para o corpo	$B_{MT}$
13	Calcular o rendimento para cada nível de treino	$\eta_{SCET}$
14	Calcular o rendimento global	$\eta_{globalt}$
15	Calcular colheita de energia para cada nível de treino	$SCE_{treino}$
16	Calcular tempo de produção de uma FCE por semana	$FCE_{tprod}$
17	Calcular produção a partir média ponderada de prática de diferentes níveis de ciclistas	$FCE_{mp}$
18	Calcular produção semanal de uma FCE	$FCE_{semanal}$
19	Calcular produção anual de uma FCE	$FCE_{anual}$
20	Calcular produção de uma FCE em 10 anos	$FCE_{total}$
21	Calcular quantidade máxima de pessoas atendidas por uma FCE	$QP_{FCE}$
22	Elaboração do inventário com as emissões de cada componente	$EG_{item i}$
23	Calcular as emissões geradas pela FCE em 10 anos	$EG_{FCE}$
24	Calcular a taxa de emissão da FCE	$TE_{FCE}$
25	Calcular as emissões evitadas pela FCE	$EE_{FCE}$
26	Calcular o percentual de fonte de proteína no consumo diário per capita do brasileiro	-----
27	Elaboração do inventário com as emissões de cada fonte de proteína	$EG_{prot}$
28	Calcular somatória das emissões de todas as fontes de proteína/dia	$EG_{padrdiet}$
29	Calcular as emissões geradas pela variação de dieta	$EG_{vardiet}$

### 3.3. Geração de Energia

O principal objetivo desta etapa (azul) é a determinação da capacidade de colheita de energia por uma FCE em 10 anos ( $FCE_{total}$ ).

Na Figura 12, o índice  $i$  varia de 1 a 2 e indica o procedimento de teste em que o experimento será realizado, estes procedimentos são detalhados nos itens 3.3.2 e 3.3.3. O índice  $j$  indica a quantidade de lâmpadas que estarão acesas durante a execução dos testes, este índice varia de 0 a 5. Os diferentes níveis de geração de energia estão diretamente ligados ao acréscimo do número de lâmpadas, este acréscimo tem o objetivo de criar uma variação de esforço durante a prática da atividade. Este aumento de lâmpadas resulta também no aumento da potência de colheita de energia. A disposição física dos sensores e componentes aqui citados é exibida na Figura 13.

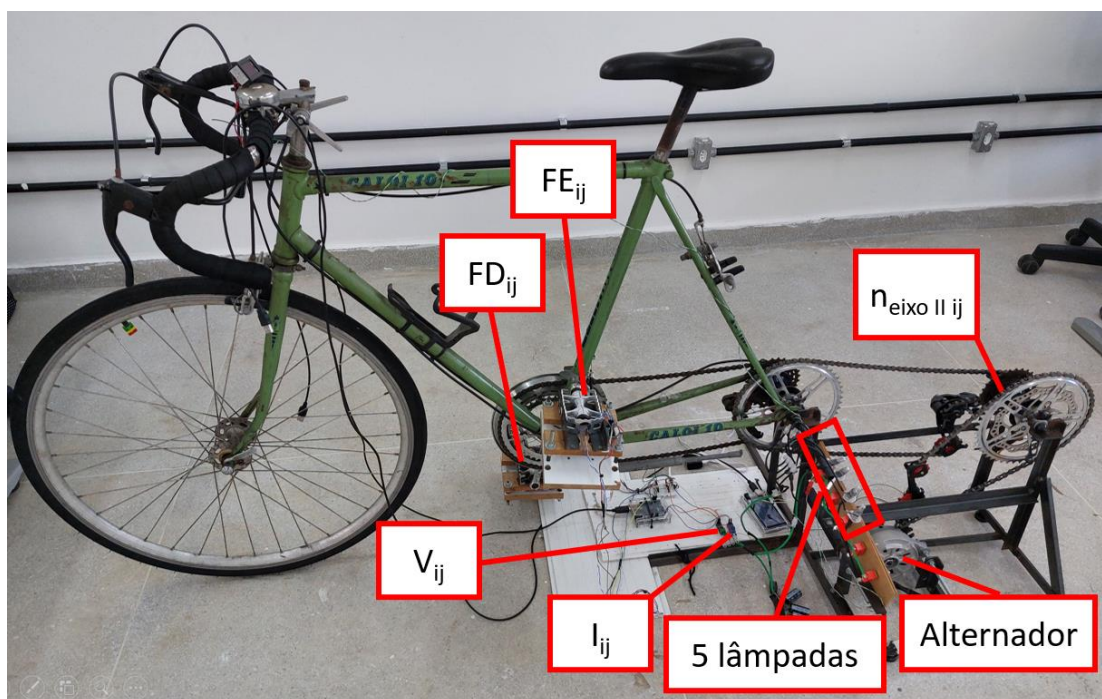


Figura 13 - Disposição física dos sensores e componentes do SCE

O trabalho máximo disponível para o corpo ( $B_{Mj}$ ) será determinado em função da potência de acionamento do sistema ( $P_{pediv ij}$ ).

A potência de acionamento do sistema ( $P_{pediv\ ij}$ ) será determinada a partir da leitura do sensor de força no pedal direito ( $F_{D\ ij}$ ) e do sensor de força no pedal esquerdo ( $F_{E\ ij}$ ) e em função da leitura do sensor de rotação posicionado no eixo intermediário II ( $\Omega_{eixoII\ ij}$ ). Como o objetivo do experimento é criar equações de  $P_{pediv\ ij}$  em função da rotação do alternador ( $\Omega_{alt\ ij}$ ), a rotação  $\Omega_{eixoII\ ij}$  será transformada em  $\Omega_{alt\ ij}$ , de acordo com a relação de transmissão entre estes eixos.

A potência de colheita de energia do sistema ( $P_{col\ ij}$ ) será determinada a partir da leitura do sensor de tensão ( $V_{ij}$ ) e da leitura do sensor de corrente ( $I_{ij}$ ). Neste caso, a rotação  $\Omega_{eixoII\ ij}$  também será transformada em  $\Omega_{alt\ ij}$ .

Como resultado, será determinado um total de 10 equações (Tabela 4).

Tabela 4 - Equações de potência de colheita e potência acionamento no pedivela.

Nível de Geração	Equações
L <sub>1</sub>	$P_{col11} = b + a \cdot \Omega_{alt11}$
	$P_{pediv11} = b + a \cdot \Omega_{alt11}$
L <sub>2</sub>	$P_{col12} = b + a \cdot \Omega_{alt12}$
	$P_{pediv12} = b + a \cdot \Omega_{alt12}$
L <sub>3</sub>	$P_{col13} = b + a \cdot \Omega_{alt13}$
	$P_{pediv13} = b + a \cdot \Omega_{alt13}$
L <sub>4</sub>	$P_{col14} = b + a \cdot \Omega_{alt14}$
	$P_{pediv14} = b + a \cdot \Omega_{alt14}$
L <sub>5</sub>	$P_{col15} = b + a \cdot \Omega_{alt15}$
	$P_{pediv15} = b + a \cdot \Omega_{alt15}$

A regressão linear será utilizada para, a partir dos dados experimentais, determinar as equações de geração de energia para cada nível de geração. Estas equações servirão para a base de cálculo e determinação de  $FCE_{total}$  (Figura 12). As equações da Tabela 4 também servirão de referência para o cálculo de produção de energia que será inserido no aplicativo GHP.

O rendimento global será em função de cada sessão de treino ( $\eta_{global}$ ) e será a razão entre a energia disponibilizada pelo corpo durante o treino ( $B_{MT}$ ) e a energia elétrica coletada durante o treino ( $SCE_{treino}$ ).

As expressões de cálculo das variáveis aqui citadas são apresentadas no item 3.3.4.

### 3.3.1. Montagem do protótipo e procedimento de testes

A principal função do sistema de colheita de energia é fazer com que o movimento exercido no pedal da bicicleta, seja transmitido ao gerador de eletricidade. A montagem do protótipo consiste em elaborar uma estrutura (vide Figura 2) que seja capaz de, a partir das possibilidades humanas de força e ritmo, realizar a transmissão do torque e rotação necessários para que o alternador gere energia elétrica. O usuário irá exercer uma força resultante no pedal ( $F_{result}$ ), a uma determinada rotação ( $\Omega_{pediv}$ ), resultando em torque de entrada ( $Tq_{pediv}$ ). O SCE será responsável por ampliar a rotação no eixo de saída e acionar o gerador.

A Figura 14 apresenta o processo de transmissão desde o acionamento do pedivela, até o movimento do gerador rotativo. Considerando-se que serão selecionadas as seguintes opções relação de transmissão disponíveis no sistema teremos  $i_1 = 52/24$  dentes = 2,17;  $i_2 = i_3 = 52/14$  dentes = 3,71;  $i_{total} = i_1 \times i_2 \times i_3 = 29,9$ .

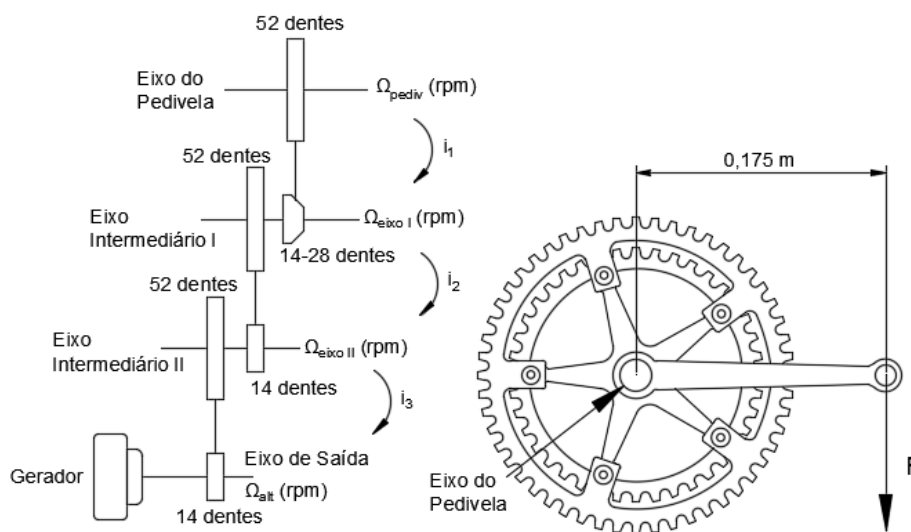


Figura 14 - Sistema de transmissão do SCE.

Para a realização dos experimentos foram utilizados os seguintes parâmetros de entrada para o processo:

- Gerador:

1 – Alternador de empilhadeira *Solarhome* 20 A, 250W, 12 Vcc.

- Níveis de geração (quantidade de lâmpadas acesas durante o teste):

1 – 55 W;

2 – 110 W;

3 – 165 W;

4 – 220 W;

5 – 275 W.

- Rotação do Alternador:

Variando de 700 rpm a 2.200 rpm.

Durante a execução dos experimentos serão coletadas as variáveis de saída Força no Pedal (sensores SFP), Corrente e Tensão (sensores SC e ST respectivamente) e Rotação do Eixo II (sensor SR), através desses valores obtidos, poderão ser calculados os valores de Força Total, Força Resultante, Cadência, Rotação do Alternador, Torque no Pedivela, Potência no Pedivela, Torque no Alternador e Potência Coletada. As fórmulas utilizadas para os cálculos dessas variáveis encontram-se no item 3.3.4.

Pelo motivo de que a coleta de dados dos sensores de força, de corrente e de tensão serem realizados através de um *loop* temporizado (leitura a cada 100 ms aproximadamente) e o sensor de rotação coletar dados através de pulso (tempo varia em função da rotação), será utilizado um microcontrolador Arduino® UNO (ARDUINO, 2025a) e um microcontrolador Arduino® MEGA (ARDUINO, 2025b), cada um conectado a um computador com a versão 1.8.19 do software Arduino® IDE (ARDUINO, 2025c), para realizar o monitoramento dos testes. Para a sincronização dos dados coletados, será utilizado o parâmetro “*Show timestamp*” do monitor serial. Este parâmetro utiliza o horário do relógio do computador, que por sua vez está sincronizado com o horário da Internet. A Figura 15 apresenta a interface do software Arduino® IDE e a função “*Show timestamp*”.

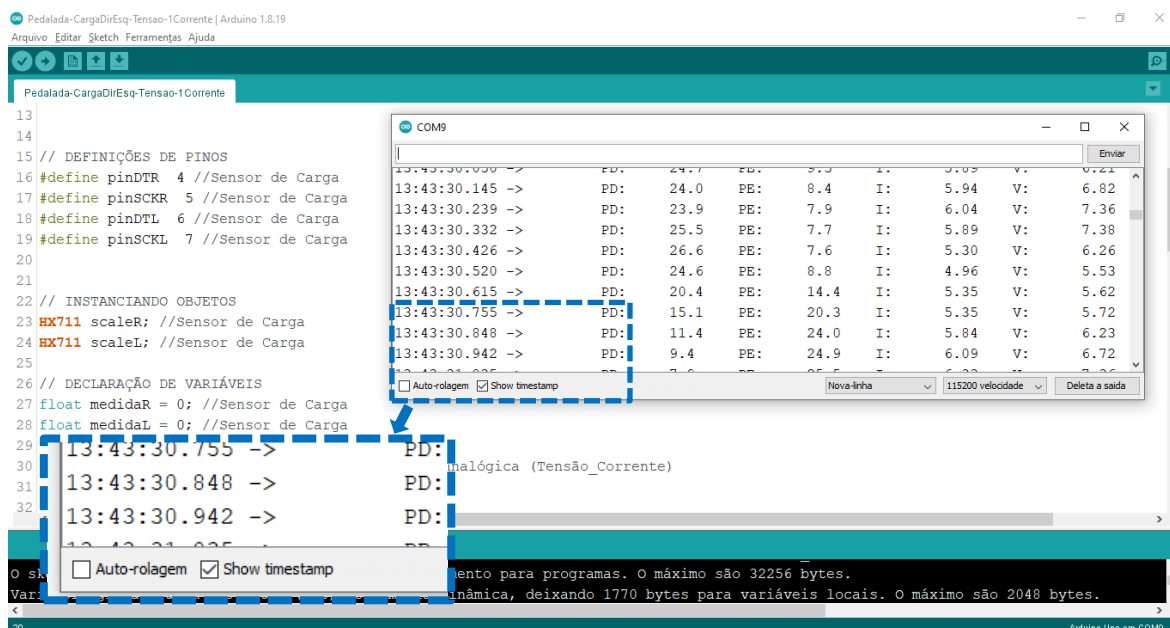


Figura 15 - Interface do Arduino IDE e função "Show timestamp"

O circuito 1 (Figura 16) é composto de um microcontrolador Arduino<sup>®</sup> UNO, que será responsável por coletar os dados de força no pedal (sensor SFP), corrente de geração (sensor SC) e tensão de geração (sensor ST), a potência gerada será calculada em função dos valores de tensão e corrente. Durante os testes, os dados serão coletados instantaneamente, através do *software* Arduino<sup>®</sup> e serão armazenados em planilhas para que possam ser tratados e analisados posteriormente. O *sketch* utilizado neste procedimento é apresentado no Apêndice 1.

Com o intuito de manter os parâmetros de corrente e tensão de saída mais estáveis, tanto em baixas quanto em altas frequências, foram inseridos 3 capacitores eletrolíticos de alta capacitância de 10.000  $\mu\text{F}$  e 3 capacitores cerâmicos de baixa capacitância de 10  $\mu\text{F}$ . A variação do nível de geração durante os testes será realizada através do acionamento das chaves interruptoras ( $CI_1$ ,  $CI_2$ ,  $CI_3$ ,  $CI_4$  e  $CI_5$ ), que serão responsáveis por acender as lâmpadas ( $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ,  $L_4$  e  $L_5$ ) e variar de forma escalonada a potência de consumo de 48 W a 240 W.

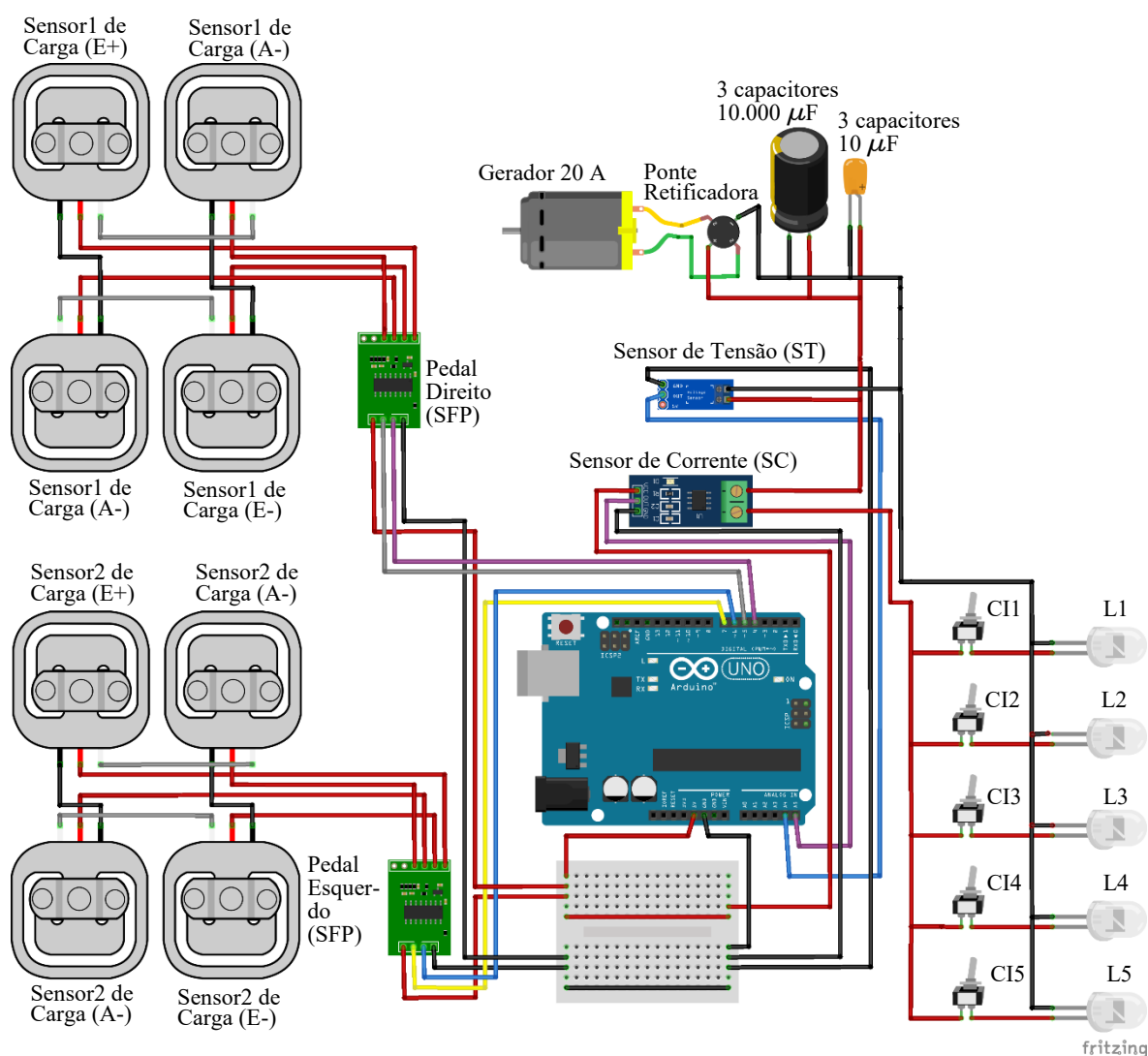


Figura 16 - Esquema do circuito 1 de monitoramento de testes.

A medição de força de cada pedal será realizada por um conjunto de 4 sensores de carga de 50 kgf cada (capacidade total de 200 kgf), dispostos em formato retangular com a finalidade de garantir melhor precisão leitura, compensando possíveis desalinhamentos da força do pé durante a pedalada.

A Figura 17 apresenta o circuito 2 que será composto de um microcontrolador Arduino® MEGA e um sensor de rotação, este circuito será o responsável por coletar os valores de rotação do eixo intermediário II. O *sketch* utilizado neste circuito é apresentado no Apêndice 2.

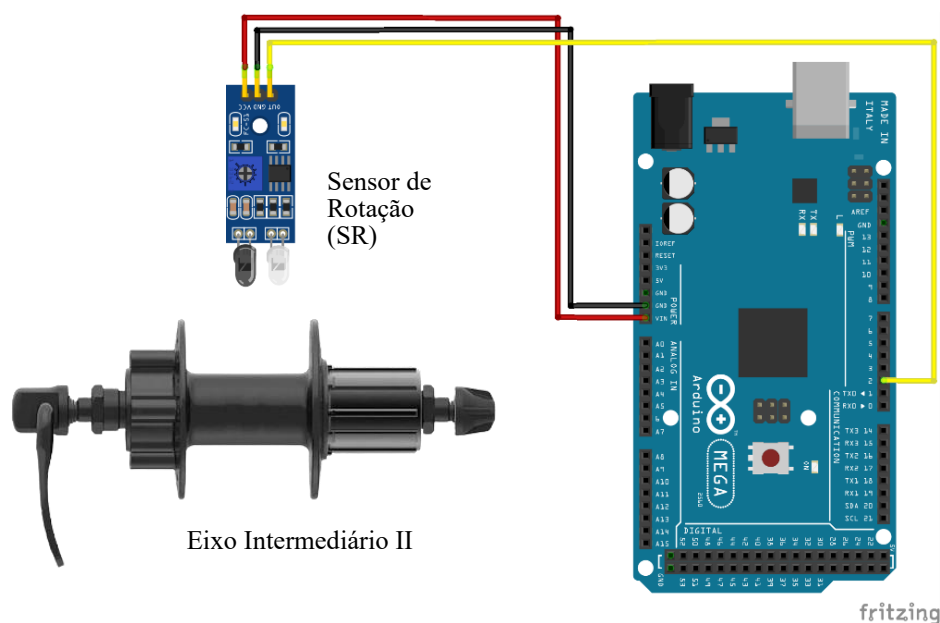


Figura 17 - Esquema do circuito 2 de monitoramento de testes

A Tabela 5 apresenta a relação de componentes, suas quantidades, os respectivos circuitos e o anexo que contém as especificações técnicas de cada item.

Tabela 5 - Componentes utilizados no procedimento de testes

Nome do componente	Quantidade	Circuito	Anexo
Conjunto de 04 Peças de Célula de Carga Sensor de Peso 50 kg e 1 Modulo HX711	2	1	1
Alternador Solarhome (12V / 20 A / CH15587)	1	1	2
Ponte Retificadora (KBPC2510 / 25 A / 1000 V)	1	1	3
Capacitor Eletrolítico (10.000 uF / 25 V)	3	1	4
Capacitor Cerâmico (10 uF / 50 V)	3	1	5
Sensor de Tensão (0 - 25 Vdc)	1	1	6
Sensor de Corrente (20 A)	1	1	7
Microcontrolador (Arduino Uno)	1	1	8
Chave interruptora (KN-1021)	5	1	9
Lâmpada (55 W)	5	1	10
Microcontrolador (Arduino Mega)	1	2	11
Sensor de Rotação (Infra Vermelho)	1	2	12

### 3.3.2. 1º procedimento de teste

O 1º procedimento será realizado com a catraca da bicicleta (Eixo Intermediário I – vide Figura 14) selecionada na 2ª marcha (24 dentes), esta marcha foi a que apresentou melhor amplitude de testes, conseguindo suprir tanto as necessidades de testes de baixa geração (ex.: 1 lâmpada), como as de alta geração (ex.: 5 lâmpadas). A utilização da 1ª marcha dificultaria principalmente os testes com 4 e 5 lâmpadas, quando fosse necessária a produção máxima de energia, o que exige rotações mais altas. Por outro lado, a 3ª marcha teria a desvantagem de ficar “pesada” principalmente no teste de 5 lâmpadas. O principal propósito de manter esta marcha fixa foi padronizar o esforço realizado no pedal, pois ao se alterar a marcha da bicicleta, as condições de força e torque necessárias para manter a potência acabam se alterando, o que dificultaria a análise dos dados.

O número de lâmpadas acesas está diretamente ligado à capacidade de geração de energia, quanto mais lâmpadas ligadas, maior será o esforço necessário para gerar energia e conseqüentemente será maior a potência de geração. Desta maneira, serão considerados 5 níveis diferentes de esforços para a geração de energia, de acordo com o número de lâmpadas acesas (de 1 a 5).

Procedimento:

1. Instalar o alternador no sistema;
2. Ativar a chave  $CI_1$ , acendendo a lâmpada  $L_1$  de 55 W. Manter o câmbio da bicicleta (Eixo Intermediário I) na 2ª marcha (24 dentes). O câmbio do Eixo Intermediário II deverá permanecer fixo na 6ª marcha durante todo o teste (engrenagem de 14 dentes);
3. Acionar o pedivela de forma que a rotação de Eixo Intermediário II fique numa faixa de 350 rpm;
4. Verificar o correto funcionamento de todos os sensores através do *software* Arduino®;
5. Manter esta faixa de rotação por 30 segundos.
6. Aumentar a rotação para uma faixa de 450 rpm no Eixo Intermediário II;
7. Manter esta faixa de rotação por 30 segundos.
8. Aumentar a rotação para uma faixa de 550 rpm no Eixo Intermediário II;

9. Manter esta faixa de rotação por 30 segundos.
10. Coletar os dados dos dois monitores seriais do *software* Arduino® e salvar;
11. Limpar os dados dos dois monitores seriais do *software* Arduino®;
12. Ativar a chave CI<sub>2</sub>, acendendo a lâmpada L<sub>2</sub>, aumentando-se o nível de consumo para 110 W. Manter o câmbio da bicicleta (Eixo Intermediário I) na 2ª marcha;
13. Repetir os passos de 3 a 11;
14. Ativar a chave CI<sub>3</sub>, acendendo a lâmpada L<sub>3</sub>, aumentando-se o nível consumo para 165 W. Manter o câmbio da bicicleta (Eixo Intermediário I) na 2ª marcha;
15. Repetir os passos de 6 a 8;
16. Ativar a chave CI<sub>4</sub>, acendendo a lâmpada L<sub>4</sub>, aumentando-se o nível consumo para 220 W. Manter o câmbio da bicicleta (Eixo Intermediário I) na 2ª marcha;
17. Repetir os passos de 6 a 8;
18. Ativar a chave CI<sub>5</sub>, acendendo a lâmpada L<sub>5</sub>, aumentando-se o nível consumo para 275 W. Manter o câmbio da bicicleta (Eixo Intermediário I) na 2ª marcha;
19. Encerrar os experimentos.

A Tabela 6 apresenta os dados coletados no 1º procedimento de testes, estes resultados foram analisados através do *software* Minitab®, para verificar se as variáveis são estatisticamente significativas, se há correlação entre elas e qual é o impacto das variáveis de entrada (no caso, Força nos Pedais e Rotação do Alternador) nas variáveis de saída (Corrente e Tensão).

Vale ressaltar que o primeiro dígito do código se refere ao procedimento do teste utilizado (1º ou 2º) e que o último dígito indica o número de lâmpadas acesas durante a realização do teste (de 1 a 5 lâmpadas).

Tabela 6 - Dados coletados no 1º procedimento de testes.

Consumo	Parâmetros coletados
1 lâmpada	Força do Pé Direito ( $F_{D11}$ ) Força do Pé Esquerdo ( $F_{E11}$ ) Rotação do Eixo Int. II ( $\Omega_{\text{eixoIII1}}$ ) Corrente ( $I_{11}$ ) Tensão ( $V_{11}$ )
2 lâmpadas	Força do Pé Direito ( $F_{D12}$ ) Força do Pé Esquerdo ( $F_{E12}$ ) Rotação do Eixo Int. II ( $\Omega_{\text{eixoIII2}}$ ) Corrente ( $I_{12}$ ) Tensão ( $V_{12}$ )
3 lâmpadas	Força do Pé Direito ( $F_{D13}$ ) Força do Pé Esquerdo ( $F_{E13}$ ) Rotação do Eixo Int. II ( $\Omega_{\text{eixoIII3}}$ ) Corrente ( $I_{13}$ ) Tensão ( $V_{13}$ )
4 lâmpadas	Força do Pé Direito ( $F_{D14}$ ) Força do Pé Esquerdo ( $F_{E14}$ ) Rotação do Eixo Int. II ( $\Omega_{\text{eixoIII4}}$ ) Corrente ( $I_{14}$ ) Tensão ( $V_{14}$ )
5 lâmpadas	Força do Pé Direito ( $F_{D15}$ ) Força do Pé Esquerdo ( $F_{E15}$ ) Rotação do Eixo Int. II ( $\Omega_{\text{eixoIII5}}$ ) Corrente ( $I_{15}$ ) Tensão ( $V_{15}$ )

### 3.3.3. 2º procedimento de teste

O 2º procedimento tem como objetivo verificar a correlação entre a força no pedal e os níveis de geração. Os experimentos consistem em manter uma determinada faixa de

rotação no Eixo Intermediário II (aproximadamente 500 rpm), coletar a força exercida nos pedais e aumentar de forma escalonada o nível de consumo. O câmbio da bicicleta (Eixo Intermediário I) deve ser mantido na 2ª marcha.

Procedimento:

1. Acionar o pedivela, de forma que a rotação do Eixo Intermediário II fique na faixa de 250 rpm, trabalhando sem consumo instantâneo (em vazio). O câmbio do Eixo Intermediário I deverá permanecer fixo na 2ª marcha (24 dentes) e do Eixo Intermediário II deverá permanecer fixo na 6ª marcha durante todo o teste (engrenagem de 14 dentes);
2. Verificar o correto funcionamento de todos os sensores através do *software* Arduino®;
3. Ativar a chave CI<sub>1</sub>, acendendo a lâmpada L<sub>1</sub> de 55 W, gerando consumo.
4. Elevar a rotação do Eixo Intermediário II para fique na faixa 500 rpm.
5. Manter a faixa de rotação de 500 rpm por aproximadamente 1 minuto.
6. Coletar os dados dos monitores seriais do *software* Arduino® de cada computador e salvar.
7. Limpar os dados dos monitores seriais do *software* Arduino®.
8. Ativar a chave CI<sub>2</sub>, acendendo a lâmpada L<sub>2</sub>, aumentando-se o nível consumo para 110 W;
9. Repetir os passos de 5 a 7;
10. Ativar a chave CI<sub>3</sub>, acendendo a lâmpada L<sub>3</sub>, aumentando-se o consumo para 165 W;
11. Repetir os passos de 5 a 7;
12. Ativar a chave CI<sub>4</sub>, acendendo a lâmpada L<sub>4</sub>, aumentando-se o consumo para 220 W;
13. Repetir os passos de 5 a 7;
14. Ativar a chave CI<sub>5</sub>, acendendo a lâmpada L<sub>5</sub>, aumentando-se o consumo para 275 W;
15. Encerrar os experimentos.

A Tabela 7 apresenta os parâmetros coletados no 2º procedimento de testes, estes parâmetros foram analisados no *software* Minitab®, os resultados destes experimentos serviram para comprovar a correlação e o fator de impacto da variação de consumo (quantidade de lâmpadas acesas) na variável Força Total.

Tabela 7 - Dados coletados no 2º procedimento de testes

Consumo	Parâmetros coletados
0 lâmpada	Força do Pé Direito ( $F_{D20}$ )
	Força do Pé Esquerdo ( $F_{E20}$ )
1 lâmpada	Força do Pé Direito ( $F_{D21}$ )
	Força do Pé Esquerdo ( $F_{E21}$ )
2 lâmpadas	Força do Pé Direito ( $F_{D22}$ )
	Força do Pé Esquerdo ( $F_{E22}$ )
3 lâmpadas	Força do Pé Direito ( $F_{D23}$ )
	Força do Pé Esquerdo ( $F_{PE23}$ )
4 lâmpadas	Força do Pé Direito ( $F_{D24}$ )
	Força do Pé Esquerdo ( $F_{E24}$ )
5 lâmpadas	Força do Pé Direito ( $F_{D25}$ )
	Força do Pé Esquerdo ( $F_{E25}$ )

### 3.3.4. Cálculo das Variáveis (Energia)

A partir dos valores coletados nos testes, as variáveis serão calculadas de acordo com as fórmulas a seguir:

- i) Força Total ( $F_{total}$ ) e Força Resultante ( $F_{result}$ )

A Figura 18 apresenta a condição de pedalada de um ciclista amador, com pedal sem a utilização de *clip*. Em (a) pode-se notar que mesmo que o ciclista exerça a maior parte da força com o pé direito ( $F_D$ ), o pé esquerdo acaba involuntariamente exercendo uma força ( $F_E$ ) que acaba sendo contrária ao movimento desejado. Em (b) é demonstrada a situação

inversa, sendo que a força no pé esquerdo ( $F_E$ ) é maior que no pé direito ( $F_D$ ), pois é o pé esquerdo que está à frente. Neste caso é o pé direito que acaba involuntariamente exercendo uma força ( $F_D$ ) contrária ao movimento desejado.

Não é objetivo deste trabalho avaliar detalhadamente a pedalada do ciclista, portanto para efeito de cálculos, será utilizada a média dos valores da força resultante ocorrida no período de 5 em 5 segundos.

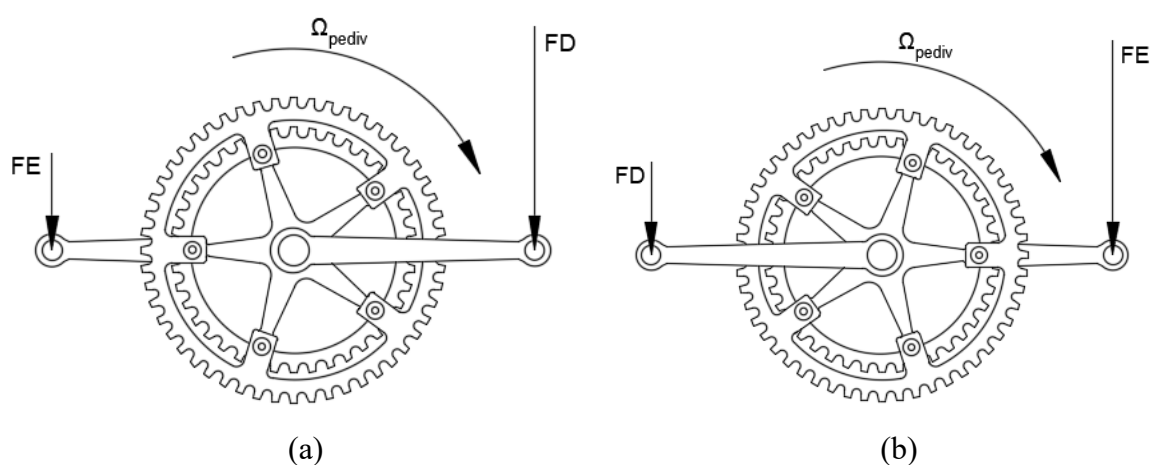


Figura 18 - Esquema de Força Durante a Pedalada

A Figura 19 demonstra que mesmo em posições inclinadas, poderá ser adotada a subtração  $F_E$  de  $F_D$ , (ou vice-versa) para o cálculo de torque no eixo, pois ambas as forças vão ter a mesma distância em relação ao centro do pedivela.

Portanto serão definidas duas variáveis de forças:

- A variável Força Total ( $F_{total}$ ) será:

$$F_{total} = F_D + F_E \quad (5)$$

Em que,  $F_{total}$  [kgf] será a força total que está sendo exercida pelo ciclista,  $F_D$  [kgf] será a força exercida no pedal direito e  $F_E$  [kgf] a força exercida no pedal esquerdo durante a prática da atividade.

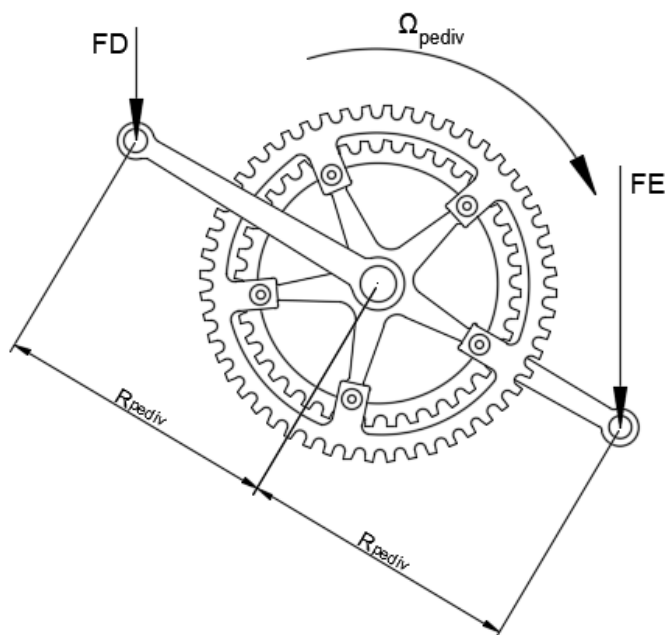


Figura 19 - Torque com Pedivela Inclinado.

- A variável Força Resultante ( $F_{result}$ ) será:

$$F_{result} = |F_D - F_E| \quad (6)$$

Em que,  $F_{result}$  [kgf] é a força resultante que irá ser responsável por transmitir o torque para o eixo do pedivela,  $F_D$  [kgf] será a força exercida no pedal direito e  $F_E$  [kgf] a força exercida no pedal esquerdo durante a prática da atividade.

ii) Torque no pedivela ( $Tq_{pediv}$ )

$$Tq_{pediv} = F_{result} \cdot R_{pediv} \cdot 9,81 \quad (7)$$

Em que,  $Tq_{pediv}$  [Nm] é o torque no eixo do pedivela,  $F_{result}$  [kgf] é a força resultante no pedivela,  $R_{pediv}$  [m] é o raio do pedivela (0,175 m) e 9,81 é o fator de conversão.

iii) Rotação no pedivela ( $\Omega_{pediv}$ )

$$\Omega_{pediv} = \frac{\Omega_{eixo II}}{i_1 \cdot i_2} \quad (8)$$

Em que,  $\Omega_{pediv}$  [rpm] é a rotação do eixo do pedivela ou cadência,  $\Omega_{eixo II}$  [rpm] é a rotação do eixo intermediário II,  $i_1$  é a relação de transmissão entre o eixo do pedivela e o eixo intermediário I e  $i_2$  é a relação de transmissão entre o eixo intermediário I e o eixo intermediário II.

Observação: A relação de transmissão  $i_1$  vai mudar de acordo com a marcha selecionada durante os testes. Os testes foram realizados em 2ª marcha que possui 24 dentes, portanto  $i_1 = 52/24 = 2,17$ .

iv) Rotação no alternador ( $\Omega_{alt}$ )

$$\Omega_{alt} = \Omega_{eixo II} \cdot i_3 \quad (9)$$

Em que,  $\Omega_{alt}$  [rpm] é a rotação do eixo do alternador,  $\Omega_{eixo II}$  [rpm] é a rotação do eixo intermediário II,  $i_3$  é a relação de transmissão entre o eixo intermediário II e o eixo de saída.

v) Potência no pedivela ( $P_{pediv}$ )

$$P_{pediv} = \frac{2\pi \cdot \Omega_{pediv} \cdot Tq_{pediv}}{60} \quad (10)$$

Em que,  $P_{pediv}$  [W] é a potência no eixo do pedivela,  $\Omega_{pediv}$  [rpm] é a rotação no eixo do pedivela e  $Tq_{pediv}$  [Nm] é o torque no eixo do pedivela e 60 é o fator de conversão.

vi) Energia no pedivela ( $E_{pediv}$ )

$$E_{pediv} = P_{pediv} \cdot t \quad (11)$$

Em que,  $E_{pediv}$  [Wh] é a energia inserida no eixo do pedivela,  $P_{pediv}$  [W] é a potência no eixo do pedivela,  $t$  [h] é o tempo de geração.

vii) Potência Coletada ( $P_{col}$ )

$$P_{col} = I \cdot V \quad (12)$$

Em que,  $P_{col}$  [W] é a potência coletada no alternador,  $I$  [A] é a corrente medida na saída do alternador e  $V$  [V] é a tensão medida na saída do alternador.

viii) Energia Coletada ( $E_{col}$ )

$$E_{col} = P_{col} \cdot t \quad (13)$$

Em que,  $E_{col}$  [Wh] é a energia coletada no eixo do alternador,  $P_{col}$  [W] é a potência no eixo do alternador,  $t$  [h] é o tempo de geração.

ix) Níveis de Treino de acordo com o preparo físico ( $NIV_{treino}$ )

No intuito de realizar simulações mais próximas da realidade, serão criados níveis de treino ( $NIV_{treino}$ ) de acordo com o preparo físico de cada ciclista. As variáveis que influenciam o nível de treinamento são: o número de lâmpadas acesas ( $L_i$ ), a rotação do alternador ( $\Omega_{alt}$ ) e o tempo de execução da atividade em função do número de lâmpadas acesas ( $t_{ativ}$ ). A Tabela 8 apresenta os níveis de intensidade e os parâmetros adotados para cada tipo de treino.

Tabela 8 - Níveis de treino de acordo com o preparo físico

$NIV_{treino}$	$t_{ativ}$ $L_1$ (min)	$\Omega_{alt}$ (rpm)	$t_{ativ}$ $L_2$ (min)	$\Omega_{alt}$ (rpm)	$t_{ativ}$ $L_3$ (min)	$\Omega_{alt}$ (rpm)	$t_{ativ}$ $L_4$ (min)	$\Omega_{alt}$ (rpm)	$t_{ativ}$ $L_5$ (min)	$\Omega_{alt}$ (rpm)
1-Base	10	2000	20	2000	---	---	---	---	---	---
2-Iniciante	5	2000	15	2000	10	1800	---	---	---	---
3-Intermediário	5	2000	5	2100	15	2100	5	2000	---	---
4-Avançado	---	---	5	2100	10	2100	10	2100	5	1800
5-Profissional	---	---	5	2100	10	2100	10	2100	5	2000

Em que,  $NIV_{treino}$  é o nível de treino de acordo com o preparo físico de cada ciclista,  $t_{ativ}$  [min] é o tempo que o ciclista executa o exercício de acordo com o número de lâmpadas acesas e  $\Omega_{alt}$  [rpm] é a rotação do alternador.

x) Trabalho máximo disponível para o corpo ( $B_{MT}$ )

$$B_{MT} = \frac{P_{pedivmed} \cdot t}{\eta_{corp}} \quad (14)$$

Em que,  $B_{MT}$  [Wh] é o valor médio do trabalho máximo disponível para o corpo a partir do metabolismo para cada nível treino,  $P_{pedivmed}$  [W] é a média da potência no eixo do pedivela para cada nível de treino,  $t$  [h] é o tempo de treino e  $\eta_{corp}$  é a eficiência de conversão corporal em atividades de ciclismo para cada nível de treino ( $\eta_{corp} \sim 30\%$  - Tabela 2).

Obs.: O tempo de treino considerado para o cálculo será de 1 hora (2 sessões de 30 min cada).

xi) Rendimento do SCE para cada nível de treino ( $\eta_{SCE}$ )

$$\eta_{SCE} = \frac{P_{colmed}}{P_{pedivmed}} \quad (15)$$

Em que,  $\eta_{SCET}$  [%] é o rendimento do sistema de colheita de energia para cada nível de treino,  $P_{colmed}$  [W] é a média da potência coletada no alternador para cada nível de treino e  $P_{pedivmed}$  [W] é a média da potência no eixo do pedivela para cada nível de treino.

xii) Rendimento do Global ( $\eta_{globalt}$ )

$$\eta_{globalt} = \frac{P_{colmed} \cdot t}{B_{MT}} \quad (16)$$

Em que,  $\eta_{globalt}$  [%] é o rendimento global do treino executado para cada nível de treino,  $P_{colmed}$  [W] é a potência coletada no alternador para cada nível de treino,  $t$  [h] é o tempo de treino e  $B_{MT}$  [Wh] é o trabalho máximo disponível para o corpo a partir do metabolismo para cada nível de treino.

Obs.: O tempo de treino considerado para o cálculo será de 1 hora (2 sessões de 30 min cada).

xiii) Colheita energia elétrica de 1 ciclista por hora ( $SCE_{treino}$ )

Para a determinação de  $SCE_{treino}$ , será levado em consideração o nível de preparo físico de ciclista, será estipulada a intensidade de treino e conseqüentemente os tempos e os níveis de esforços que o ciclista é capaz de executar. A Tabela 9 apresenta os valores de colheita de energia para 1 hora de prática em função do preparo físico do ciclista. O Apêndice 3 detalha os cálculos de tempos e a colheita de energia para cada nível de intensidade de treino.

Em que,  $NIV_{treino}$  é o nível de treino de acordo com o preparo físico de cada ciclista,  $SCE_{treino}$  [Wh] é a colheita de energia de 1 ciclista pedalando por 1 h (2 treinos de 30 min).

Tabela 9 - Colheita de energia em função do preparo físico

$NIV_{treino}$	Duração do Treino (h)	$SCE_{treino}$ (Wh)
1-Base	1	63,8
2-Iniciante	1	66,7
3-Intermediário	1	77,5
4-Avançado	1	79,6
5-Profissional	1	81,5

- xiv) Tempo de prática de ciclismo que uma FCE disponibiliza por semana ( $FCE_{tprod}$ )

$$FCE_{tprod} = NS_{dia} \cdot t_{treino} \cdot 7 \quad (17)$$

Em que,  $FCE_{tprod}$  [h] é o tempo de prática de ciclismo que uma FCE disponibiliza por semana,  $NS_{dia}$  é o número de sessões disponíveis por dia em uma FCE (no caso serão 18 sessões) e  $t_{treino}$  é o tempo de realização de treino [h].

- xv) Produção de energia de uma FCE por semana ( $FCE_{semanal}$ )

Para calcular  $FCE_{semanal}$  será considerado que no decorrer da semana haja ciclistas com diferentes níveis de preparo físico e que haverá também evolução de quem pratica, desta maneira será utilizada uma média ponderada ( $FCE_{mp}$ ) da produção semanal em função da combinação dos tipos de treinos e da porcentagem de ciclistas de cada categoria. A Tabela 10 mostra o percentual estipulado neste estudo para cada nível e a média ponderada.

Tabela 10 - Percentual de ciclistas por nível de preparo físico

<b>Intensidade do Treino</b>	<b>Percentual</b>	<b><math>SCE_{treino}</math> (Wh)</b>	<b>Contribuição (Wh)</b>
1-Base	4,0%	63,8	2,55
2-Iniciante	15,0%	66,7	10,01
3-Intermediário	38,0%	77,5	29,45
4-Avançado	28,0%	79,6	22,30
5-Profissional	15,0%	81,5	12,23
<b>Média Ponderada (<math>FCE_{mp}</math>)</b>			<b>76,53</b>

$$FCE_{semanal} = \frac{FCE_{mp} \cdot FCE_{tprod} \cdot N_{ciclistas}}{1000} \quad (18)$$

Em que,  $FCE_{semanal}$  [kWh] é a produção semanal de energia elétrica de uma FCE,  $FCE_{mp}$  [kWh] é a média ponderada da produção semanal em função dos níveis diferentes de preparo físico,  $FCE_{tprod}$  [h] é o tempo de prática de ciclismo que uma FCE disponibiliza por semana e  $N_{ciclistas}$  é o número total de ciclistas que uma FCE pode comportar simultaneamente (no caso desta FCE, são 32 praticantes).

xvi) Capacidade anual de Colheita de Energia da FCE ( $FCE_{anual}$ )

$$FCE_{anual} = FCE_{semanal} \cdot 52 \quad (19)$$

Em que,  $FCE_{anual}$  [kWh/ano] é a capacidade de geração de energia elétrica de uma FCE durante 1 ano de produção,  $FCE_{semanal}$  [kWh] é a produção semanal de energia elétrica de uma FCE e 52 é o número de semanas em 1 ano.

xvii) Capacidade de Colheita de Energia da FCE em 10 anos ( $FCE_{total}$ )

$$FCE_{total} = FCE_{anual} \cdot 10 \quad (20)$$

Em que,  $FCE_{total}$  [kWh/10 anos] é a capacidade de geração de energia elétrica de uma FCE durante 10 anos de produção e  $FCE_{anual}$  [kWh] é a capacidade de geração de energia elétrica de uma FCE durante 1 ano de produção.

xviii) Quantidade máxima de pessoas atendidas por uma FCE ( $QP_{FCE}$ )

$$QP_{FCE} = \frac{FCE_{tprod} \cdot 32}{2,5} \quad (21)$$

Em que,  $QP_{FCE}$  [unidade] é a quantidade máxima de pessoas atendidas por uma FCE,  $FCE_{tprod}$  [h] é o tempo de prática de ciclismo que uma FCE disponibiliza por semana, 32 é o número de SCEs e 2,5 é o tempo de prática (em horas) recomendado por semana.

Obs.: Esta quantidade máxima de pessoas atendidas está levando em consideração que 100% dos treinos disponíveis são ocupados pelos praticantes

#### 3.3.4.1. Preparação dos dados para a análise.

Os dados coletados durante os testes passaram por um tratamento antes de serem inseridos no *software* Minitab<sup>®</sup>, foram adotados os seguintes procedimentos:

- Os valores de  $P_{col}$  que menores que 4 W foram excluídos da análise;
- Para dar maior uniformidade das variáveis obtidas a partir do 1º procedimento de testes, os seus valores foram agrupados de 5 em 5 segundos e posteriormente extraído o seu valor médio.
- Para sincronizar os parâmetros coletados nos dois módulos Arduino<sup>®</sup>, foi utilizado o critério apresentado na Figura 20. O resultado do cálculo utilizado para sincronizar o tempo das variáveis de força (pedal direito e esquerdo), corrente e tensão com o tempo da rotação

(Célula A3) será a média entre os valores do tempo imediatamente anterior e o tempo imediatamente posterior a medição da rotação.

	A	B	C	D	E	F
1	Tempo (s)	Rotação Eixo II (rpm)	Força Pedal Direito (kgf)	Força Pedal Direito (kgf)	Corrente I (A)	Tensão V (V)
2	15:26:30.768		18	27	0,86	2,15
3	15:26:30.838	159	=MÉDIA(C2;C4)	=MÉDIA(D2;D4)	=MÉDIA(E2;E4)	=MÉDIA(F2;F4)
4	15:26:30.862		24	21,9	2,08	2,69

	A	B	C	D	E	F
1	Tempo (s)	Rotação Eixo II (rpm)	Força Pedal Direito (kgf)	Força Pedal Direito (kgf)	Corrente I (A)	Tensão V (V)
2	15:26:30.768		18	27	0,86	2,15
3	15:26:30.838	159	21,0	24,5	1,47	2,42
4	15:26:30.862		24	21,9	2,08	2,69

Figura 20 - Critério de Sincronização de Dados

### 3.3.5. Análise dos dados de testes.

Foi realizada a regressão linear, utilizando-se o modelo de ordem linear. As expressões da potência coletada em função do consumo (número de lâmpadas ligadas), foram inseridas no aplicativo e serviram de base para os cálculos dos fatores que são disponibilizados para o usuário no aplicativo GHP (ex. energia gerada no treino, emissões evitadas etc.).

O coeficiente de Pearson foi utilizado para avaliar a correlação entre as variáveis, a Tabela 11 apresenta os valores do coeficiente r e sua respectiva correlação.

Tabela 11 - Coeficientes r de correlação de Pearson

Coeficiente de Correlação	Correlação
$r = 1$	Perfeita Positiva
$0,8 \leq r < 1$	Forte Positiva
$0,5 \leq r < 0,8$	Moderada Positiva
$0,1 \leq r < 0,5$	Fraca Positiva
$0 < r < 0,1$	Ínfima Positiva
0	Nula
$-0,1 < r < 0$	Ínfima Negativa
$-0,5 < r \leq -0,1$	Fraca Negativa
$-0,8 < r \leq -0,5$	Moderada Negativa
$-1 < r \leq -0,8$	Forte Negativa
$r = -1$	Perfeita Negativa

### 3.3.6. Calibração dos sensores de medição

Os sensores de medição foram calibrados de forma comparativa com outros instrumentos de medição e foram realizados ajustes na programação do Arduino/Excel para corrigir os parâmetros que apresentaram diferenças de leitura.

Os medidores de tensão e corrente foram calibrados de acordo com as leituras de um multímetro digital MINIPA-ET-1507B (Anexo 13).

O sensor de rotação foi calibrado de acordo com as medições de um tacômetro digital a laser TDV 100 VONDER (Anexo 14).

Os sensores de força no pedal foram calibrados de acordo com a medição de uma balança digital de alta precisão (Anexo 15).

### 3.3.7. Propagação dos erros

Levando-se em consideração que as medições experimentais foram realizadas por meio de sensores conectados a um microcontrolador Arduino e que os valores obtidos foram

utilizados posteriormente em cálculos para a determinação dos parâmetros necessário, as incertezas associadas a estas medições tiveram a sua propagação de erro calculadas.

As incertezas foram consideradas a partir das especificações técnicas dos sensores (Anexos 1, 6, 7 e 12) e da resolução do conversor analógico-digital do microcontrolador (Anexos 8 e 11).

A propagação das incertezas foi avaliada utilizando o método clássico de propagação de erros, baseado na soma quadrática das contribuições individuais, conforme a equação a seguir (INMETRO, 2008):

$$u_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot u_{x_i} \right)^2} \quad (22)$$

Em que,  $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  representa a grandeza calculada,  $x_i$  as grandezas medidas e  $u_{x_i}$  suas respectivas incertezas.

Os resultados da propagação dos erros encontram-se no Apêndice 4.

### 3.3.8. Montagem do conjunto para uso

Nesta etapa ocorrerão os ajustes de montagem, com a finalidade de preparar o SCE para a prática da atividade física. Serão retirados os componentes utilizados somente para a fase de testes (módulos Arduino<sup>®</sup>, sensores do pedal e interruptores) e será inserido um módulo ESP 32 com acesso à internet (ESPRESSIF SYSTEMS, 2025).

No contexto de montagem para uso, haverá um tipo de programação que será responsável pelas ações e pelo monitoramento realizados pelo ESP 32 e uma programação do aplicativo para o celular, que será responsável por gerenciar a comunicação entre o dispositivo móvel (neste caso um celular Android) e o ESP 32. Para que ocorra a comunicação entre o ESP 32 e o Android, será configurado um servidor “*broker*”, que será responsável por receber as informações do módulo microcontrolador e enviá-las ao aplicativo GHP no Android ou vice-versa, conforme demonstrado na Figura 21.

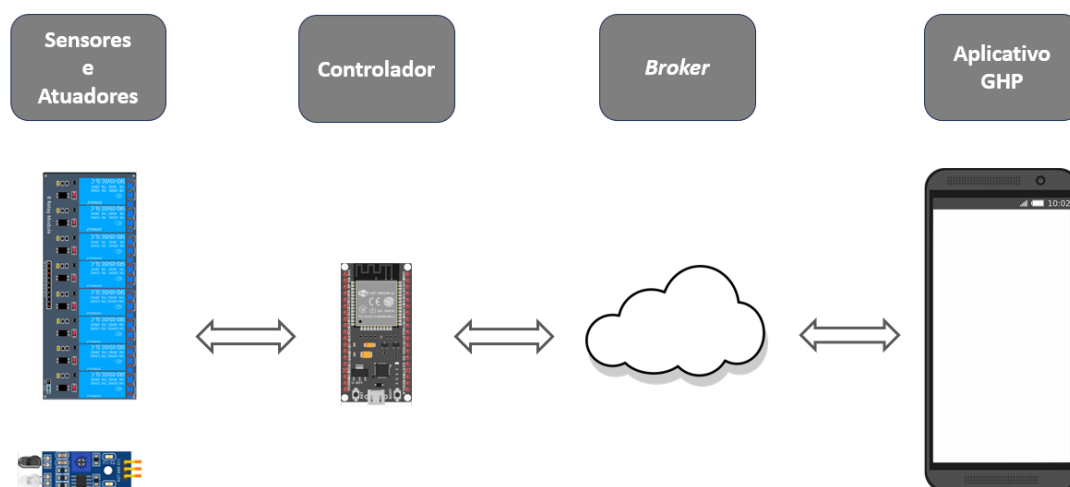


Figura 21 - Fluxo de Comunicação do SCE no modo para uso

A programação do ESP 32 será realizada através da versão 1.8.19 do *software* Arduino® IDE e a programação do aplicativo GHP será realizada através do *software* MIT APP Inventor (MIT, 2025).

A Figura 22 exibe o esquema de funcionamento do ESP 32 no modo para uso. Neste modo, a rotação do eixo intermediário II é captada pelo sensor (SR1) e o *status* do número de lâmpadas acesas através dos relés (de R1 a R5). Estes dados serão enviados para o *broker* continuamente durante o treino, o aplicativo GHP recebe estas informações do *broker*, realiza os cálculos, de acordo com a sua programação, e disponibiliza dos valores para o usuário.

Outra função do aplicativo GHP é enviar sinal de comando para os relés através do ESP 32. De acordo com a programação de intensidade de treino, os relés mudarão de *status*, quanto mais relés ativados, maior o esforço de treino e maior também a quantidade de energia gerada.

O Apêndice 5 mostra o *sketch* utilizado na programação no ESP 32 no modo para uso. O aplicativo GHP será explicado detalhadamente no item 3.4.

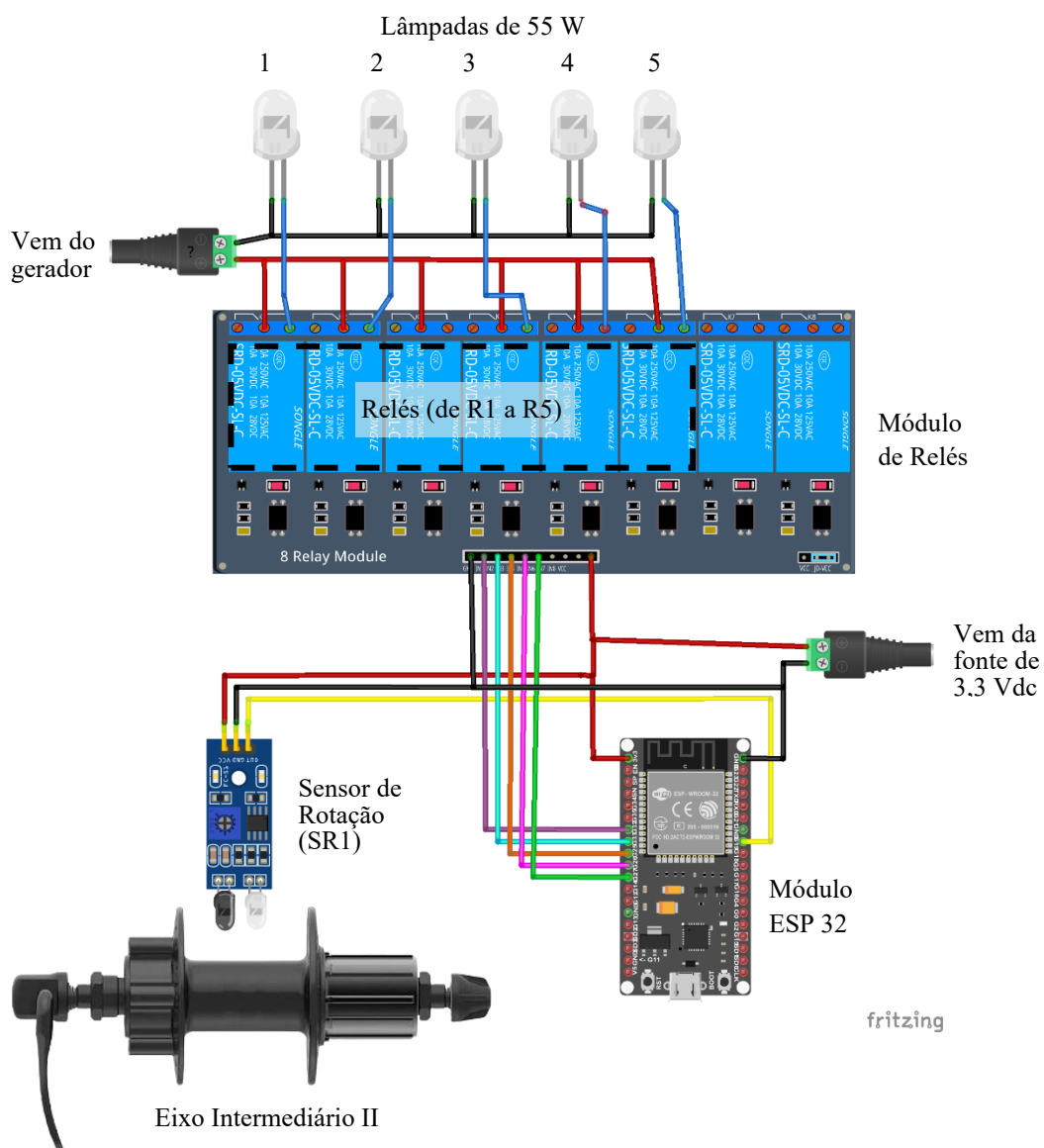


Figura 22 - Esquema de funcionamento do modo para uso.

A Tabela 12 exibe a descrição dos componentes, as quantidades e seus respectivos anexos.

Tabela 12 - Componentes utilizados no Modo para Uso

Nome do componente	Quantidade	Anexo
Microcontrolador ESP32-WROOM-32 Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6	1	16
Módulo Relé 3 V / 10 A / 8 Canais com Borne KRE para ESP32	1	17
Sensor de Rotação (Infra Vermelho)	1	12
Lâmpada (55 W)	5	10

### 3.4. Aplicativo GHP (*Greener&Healthier Power*)

O aplicativo GHP é um conceito inovador em sistemas de colheita de energia realizada a partir de prática de atividades físicas, ele foi desenvolvido para parear um dispositivo móvel com o microcontrolador ESP 32 do sistema de colheita de energia *Greener&Healthier Power*. Este aplicativo é composto por 25 telas diferentes e possui a lógica de funcionamento e os intertravamentos necessários para realizar o gerenciamento de todos os treinos realizados. O GHP é um dos principais diferenciais do sistema criado neste estudo e tem as principais finalidades a seguir:

- Proporcionar interação entre o usuário e o sistema de geração;
- Gerenciar a variação de tempo e esforço durante a prática da atividade;
- Tornar a prática de ciclismo *indoor* mais prazerosa;
- Informar parâmetros (velocidade, distância, etc.) durante a prática;
- Incentivar a prática do ciclismo *indoor* demonstrando, através de um totalizador de treinos, os parâmetros de calorias gastas, energia elétrica coletada e emissões de GEE evitadas.

O aplicativo GHP poderá ser disponibilizado para *download* em plataformas de aplicativos para dispositivos móveis (Ex.: *App Store*). A Figura 23 exibe a estrutura de telas contidas no aplicativo.

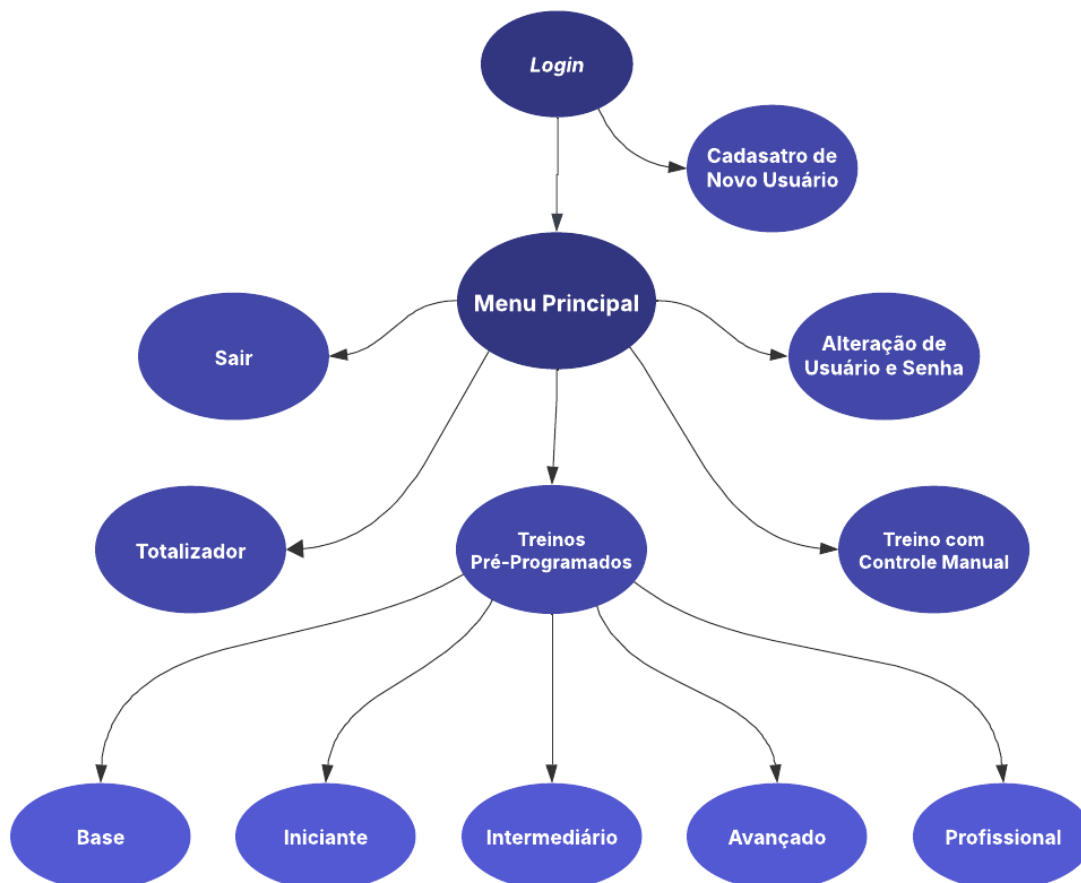


Figura 23 - Esquema de telas do aplicativo GHP

### 3.4.1. Telas: *Login* e Cadastro de Novo Usuário

Ao inicializar o aplicativo, será exibida a tela “*Login*” (Figura 24 (a)). Caso seja usuário novo, é necessário selecionar a opção de primeiro acesso. A tela “Cadastro de Novo Usuário” (Figura 24 (b)) será exibida e o usuário pode realizar o seu primeiro cadastro. Ao voltar à tela de “*Login*”, o usuário pode entrar no aplicativo e ter acesso a tela “Menu Principal” (Figura 25). Todas as telas após a realização do *login* exibirão o nome do usuário.

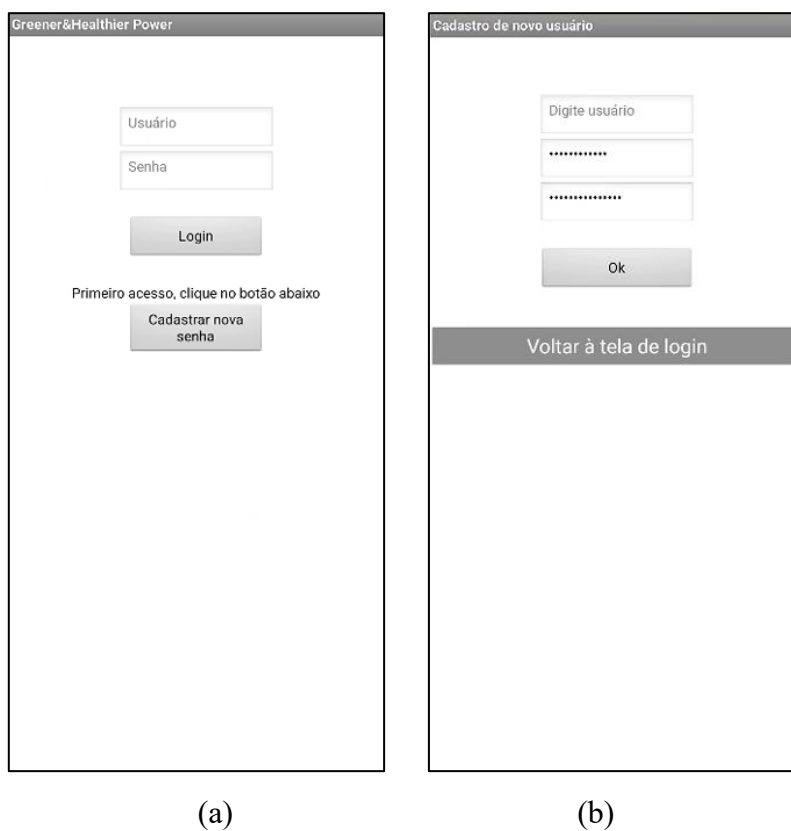


Figura 24 - Telas do Aplicativo: *Login*, Cadastro de Novo Usuário

O fluxograma de programação desta tela, realizada no App Inventor, é demonstrada no Apêndice 6.

### 3.4.2. Tela: Menu Principal

A tela “Menu Principal” (Figura 25) possui 5 botões que dão acesso a outras telas:

- Botão “Treinos Pré-Programados”;
- Botão “Treinos com Controle Manual”;
- Botão “Totalizador”;
- Botão “Alteração de Usuário Senha”;
- Botão “Sair” – este botão fecha o aplicativo.

Esta é a tela principal do aplicativo e durante sua utilização, o usuário sempre terá um botão com a opção “Voltar ao Menu Principal” nas telas de navegação.

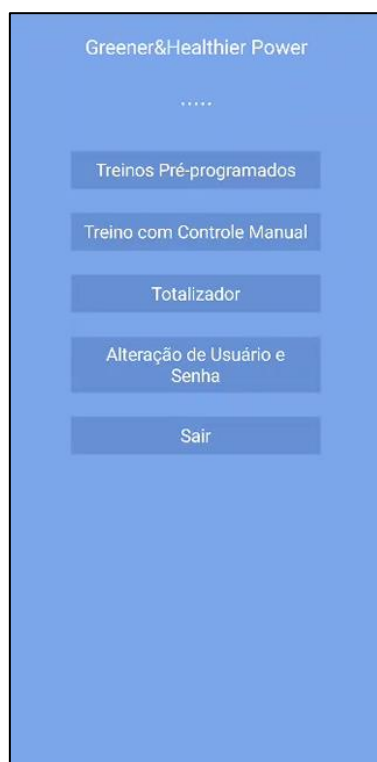


Figura 25 - Tela do aplicativo: Menu Principal

O Apêndice 7 exibe fluxograma da programação do aplicativo para esta tela.

### 3.4.3. Tela: “Treinos Pré-Programados”

A tela de “Treinos Pré-Programados” (Figura 26) é composta por botões que dão acesso às telas de treino de acordo com o nível de preparo físico do praticante:

- Base - 2 botões;
- Iniciante - 4 botões;
- Intermediário - 4 botões;
- Avançado - 4 botões;
- Profissional - 4 botões;

Os treinos de Base, por exemplo são destinados aos recém-chegados e tem por finalidade fazer inicialmente a preparação do corpo para os treinos de maior intensidade. Portanto, a programação do aplicativo para estes treinos será focada em treinos com menores tempos e intensidades de esforço baixas.

A intensidade dos treinos vai aumentando gradativamente nas categorias “Iniciante”, “Intermediário”, “Avançado” e “Profissional”. A programação dos tempos em cada intensidade dos treinos vai seguir os valores apresentados na Tabela 13.



Figura 26 - Telas do aplicativo: Treinos Pré-Programados

Tabela 13 - Relação de tempo e nível de esforço por nível de preparo físico

Categoria de Treino	Nível de Esforço (Nº de lâmpadas)					Tempo Total (min)
	L1	L2	L3	L4	L5	
Base	10	20	---	---	---	30
Iniciante	5	15	10	---	---	30
Intermediário	5	5	15	5	---	30
Avançado	---	5	10	10	5	30
Profissional	---	5	10	10	5	30

Obs.: Os tempos do nível Avançado e Profissional são os mesmos, porém a rotação prevista para o nível Profissional é mais alta.

O fluxograma resumido da programação desta tela do aplicativo encontra-se no Apêndice 8.

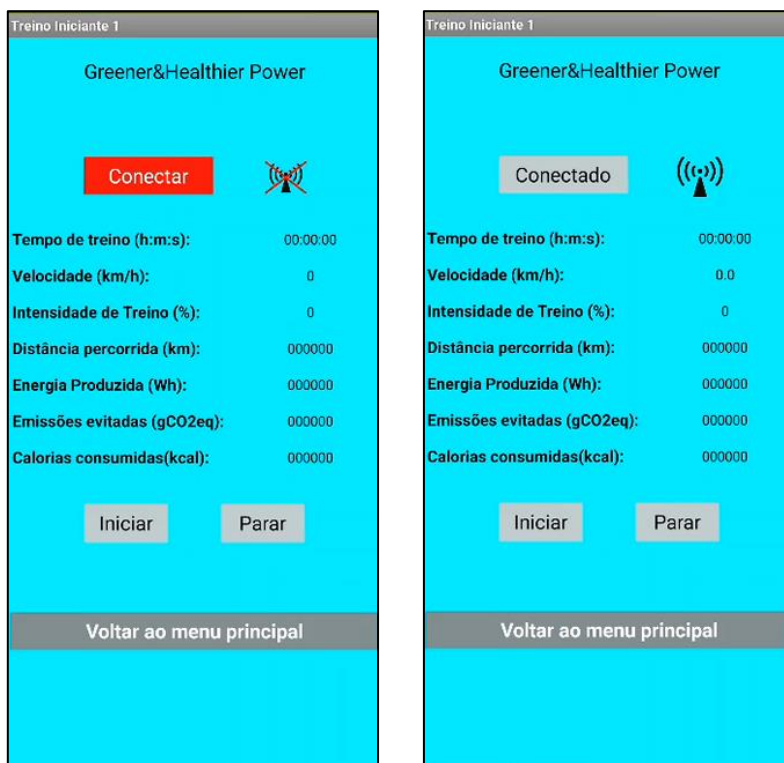
#### **3.4.4. Tela: “Iniciante1”**

Ao clicar, por exemplo no botão do treino “Iniciante 1”, o aplicativo abre a tela de treino (Figura 27 (a)) que terá na programação, as características de tempo e esforços do nível escolhido. As demais telas (Base 1, Base 2, Iniciante 2, Intermediário 1, etc.) possuem o mesmo formato e estrutura de programação, o que vai mudar serão os tempos e os níveis de esforço durante a atividade.

Para que o treino seja devidamente monitorado, é necessário que o usuário conecte o aplicativo ao *broker* e ao ESP 32 (Figura 21), para isto basta clicar no botão “Conectar” e aguardar o *status* de “Conectado” (Figura 27 (b)). O próximo passo é clicar no botão “Iniciar” e o treino começa a ser registrado. Os parâmetros (tempo, velocidade, distância, etc.) passam a ser exibidos em tempo real.

A variação de intensidade de esforço e o tempo de permanência em cada intensidade é definida pela programação do aplicativo e de acordo com os tempos e intensidades demonstrados no Apêndice 3.

A Figura 28 apresenta um exemplo de programação para a opção Iniciante 1, o Apêndice 9 apresenta a programação para as 4 programações existentes para o nível Iniciante. Vale ressaltar que a intensidade de esforço está diretamente ligada ao número de lâmpadas acesas durante a prática, estas lâmpadas são comandadas automaticamente pelo aplicativo GHP, através do comando de acionamento dos relés ligados ao ESP 32.



(a)

(b)

Figura 27 - Telas: "Iniciante 1"

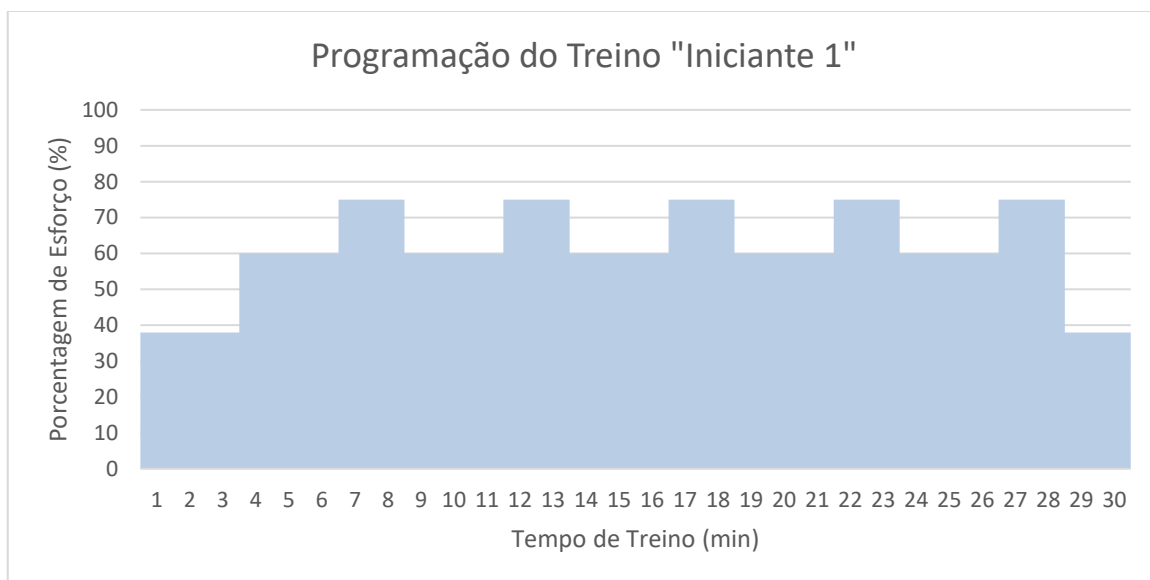


Figura 28 - Exemplo de treino pré-programado "Iniciante 1"

O aplicativo também possui sequência lógica de utilização:

- Caso o botão “Iniciar” seja acionado sem o dispositivo estar conectado, será exibida uma mensagem “É necessário conectar!” (Figura 29 (a))

- Se o botão “Voltar ao menu principal” for acionado durante à prática, aparecerá uma mensagem de confirmação com a seguinte pergunta “Tem certeza que deseja sair sem salvar o treino?” e as opções “Sim” ou “Não” (Figura 29 (b)). Se optar pelo “Sim” o usuário volta a tela de “Menu principal” sem salvar os dados do treino. Ao optar pelo “Não” o usuário volta à tela de treino e continua treinando.

Todos os treinos pré-programados possuem 30 minutos de prática e são finalizados automaticamente ao término deste tempo. O aplicativo para o treino e disponibiliza o botão “Salvar Treino”, ao clicar neste botão o aplicativo armazenará os valores dos parâmetros do treino recém realizado e somará com os valores já existentes no totalizador. A tela “Totalizador” (Figura 33 (a)) será aberta para que o usuário possa visualizar o acumulado de todos os seus treinos. O fluxograma resumido da programação da tela “Iniciante 1” encontra-se no Apêndice 10.

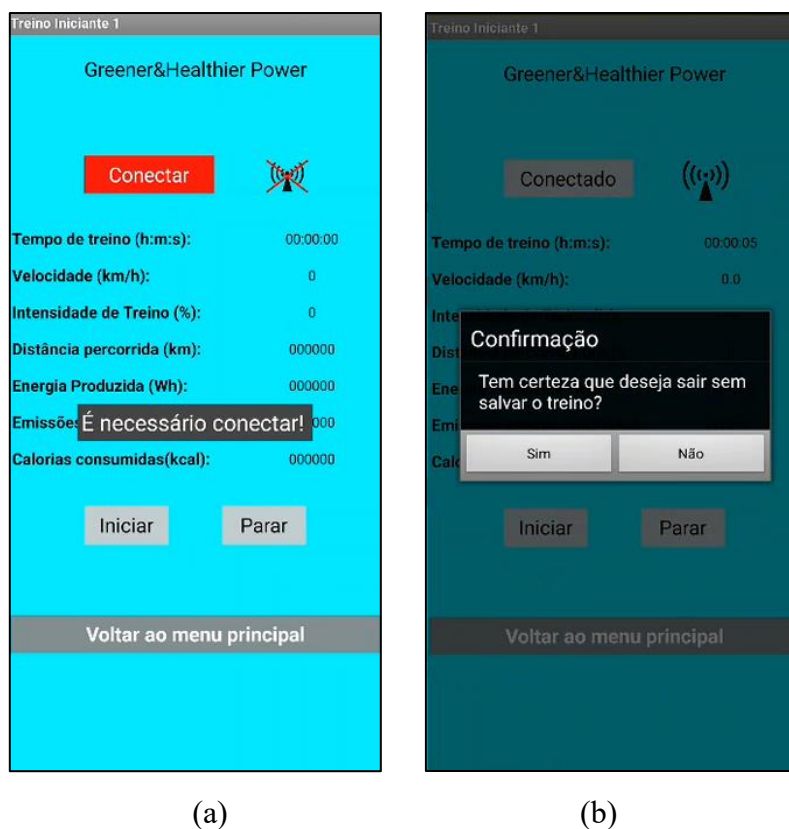


Figura 29 - Tela: "Iniciante 1" - Lógica de utilização

### 3.4.5. Sistema de Automação da Intensidade de Treino

Para que o aplicativo realize automaticamente a variação de intensidade de treino e seu respectivo tempo, será necessário criar no App Inventor, relógios temporizadores (*clock*) que serão responsáveis por comandar o Liga/Desliga dos relés. A Figura 30 apresenta um exemplo dos temporizadores necessários para automatizar o treino “Iniciante 1”.

Logo após o usuário apertar o botão “Iniciar” (100 ms), o *clock* (clkLigaR1) envia sinal para ativar o relé 1 e acender a lâmpada 1, gerando uma porcentagem de esforço 38% do total (esse valor foi calculado através da regressão dos dados do 2º procedimento de testes) (Tabela 20). Aos 4 min (240.000 ms) de treino, o *clock* (clkLigaR2) envia sinal para ativar o relé 2 e acender a lâmpada 2 e aumentar o esforço (porcentagem de esforço 60% do total). Aos 7 min (420.000 ms) de treino, o *clock* (clkLigaR3) envia sinal para ativar o relé 3 e acender a lâmpada 3 e aumentar o esforço (porcentagem de esforço 75% do total). Aos 8 min (480.000 ms) de treino, o *clock* (clkDesligaR3) envia sinal para desativar o relé 3 e apagar a lâmpada 3 e reduzir o esforço (porcentagem de esforço 60% do total). A sequência de aumentar e reduzir o esforço continua da mesma forma até o tempo de 28 min (1.680.000 ms), quando o *clock* (clkDesligaR2) envia sinal para desativar o relé 2 e, ao mesmo tempo, o *clock* (clk5DesligaR3) envia sinal para desativar o relé 3, reduzindo o esforço para 38% do total. O sistema permanece neste nível de esforço por 2 min para realizar o desaquecimento e aos 30 min de treino o *clock* (clkDesligaR1) envia sinal para desativar o relé 1 e, ao mesmo tempo, o *clock* (clkBotaoParar) envia o comando para parar o treino. Em seguida o botão “Salvar Treino” é disponibilizado e os dados de treino poderão ser salvos.

A configuração de todos os *clocks* utilizados na automação do treino “Iniciante 1” encontra-se no Apêndice 11.

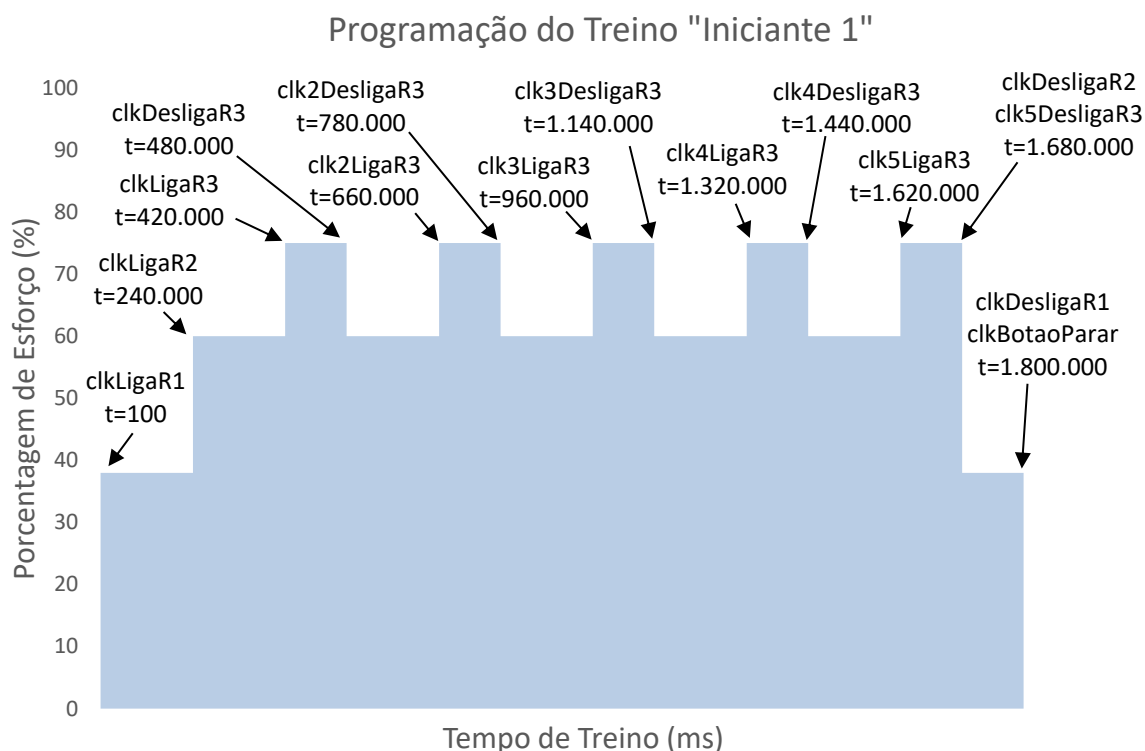


Figura 30 - Automação do Controle e Esforço e Tempo de Duração

### 3.4.6. Tela “Treino de Controle Manual”

A tela “Treino de Controle Manual” (Figura 31 (a)) apresenta em tempo real os valores das variáveis durante a realização do treino e ao final armazena estes dados no totalizador. Da mesma forma que nos treinos pré-programados, para que o treino seja devidamente monitorado e salvo, é necessário que o usuário conecte o aplicativo ao *broker* e ao ESP 32, para isto basta clicar no botão “Conectar” e aguardar o *status* de “Conectado” (Figura 31 (b)). O próximo passo é clicar no botão “Iniciar” e o treino começa a ser registrado. Os parâmetros (tempo, velocidade, distância, etc.) passam a ser exibidos em tempo real.

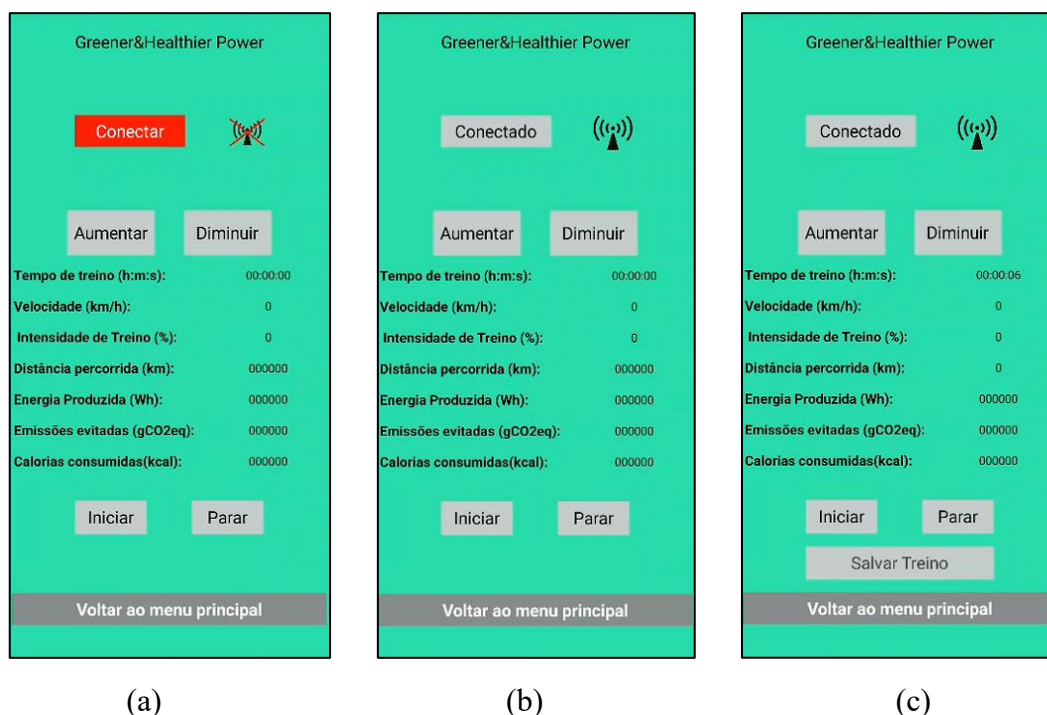


Figura 31 - Tela do aplicativo: Treino com Controle Manual

Ao se acionar o botão “Aumentar”, o aplicativo faz uma verificação de qual nível de intensidade de treino o sistema se encontra. No início do treino ainda não há nenhuma lâmpada acesa, desta maneira o aplicativo envia um comando para o ESP 32 para que seja energizado o relé 1, que por sua vez aciona a lâmpada 1. O esforço aumenta e o parâmetro “Intensidade de Treino” passa a exibir o valor 38%. Ao apertar novamente o botão “Aumentar” o aplicativo verifica que já tem uma lâmpada acesa e envia o comando para o ESP 32 acionar a lâmpada 2 (relé 2), o esforço aumenta para 60% do esforço máximo. Este procedimento do botão “Aumentar” vai se repetindo desta forma até que sejam acesas as 5 lâmpadas e o esforço fique em 100%. Após isso, ao se apertar o botão “Diminuir” o aplicativo verifica quantas lâmpadas estão acesas (no caso 5 lâmpadas) e envia um comando para o ESP 32 desenergizar o relé 5 e reduzir a intensidade de esforço. Essa redução de esforço pode ser realizada consecutivamente até que se chegue em 0 lâmpadas.

O acionamento dos botões “Aumentar” e “Diminuir” pode ser realizado a qualquer momento, independentemente do número de lâmpadas que estão acesas, que o aplicativo verifica o *status* atual e toma a decisão necessária.

Ao se acionar o botão “Parar” o aplicativo interrompe as medições e o botão “Salvar

Treino” (Figura 31 (c)) é disponibilizado. Ao apertar o botão “Salvar Treino”, todos os valores são salvos e somados aos valores já existentes no totalizador. O aplicativo abre a tela “Totalizador” (Figura 33 (a)) para exibir os novos valores após a realização do último treino.

A tela “Treino de Controle Manual” também possui sequência lógica de utilização:

- Caso o botão “Iniciar” seja acionado sem o dispositivo estar conectado, será exibida uma mensagem “É necessário conectar!” (Figura 32 (a)).

- Caso os botões “Aumentar” ou “Diminuir” sejam acionados sem o treino ter sido iniciado, será exibida a mensagem “Iniciar treino!” (Figura 32 (b)).

- Caso o botão “Voltar ao menu principal” seja acionado durante a execução do treino, será exibida uma caixa de confirmação com a mensagem “Tem certeza que deseja sair sem salvar o treino?” e abaixo um botão “Sim” e outro “Não” (Figura 32 (c)). Ao optar pelo “Sim” o aplicativo vai para o menu principal e não salva os dados do treino que estava em andamento, ao optar pelo “Não” o aplicativo volta novamente para a tela de treino.

A programação da tela “Treino com Controle Manual” é basicamente a mesma utilizada na tela “Iniciante 1”, a principal diferença é que a programação que era automática passa a ser realizada manualmente. O fluxograma resumido com os comandos de controle manual do aplicativo é demonstrado no Apêndice 12.

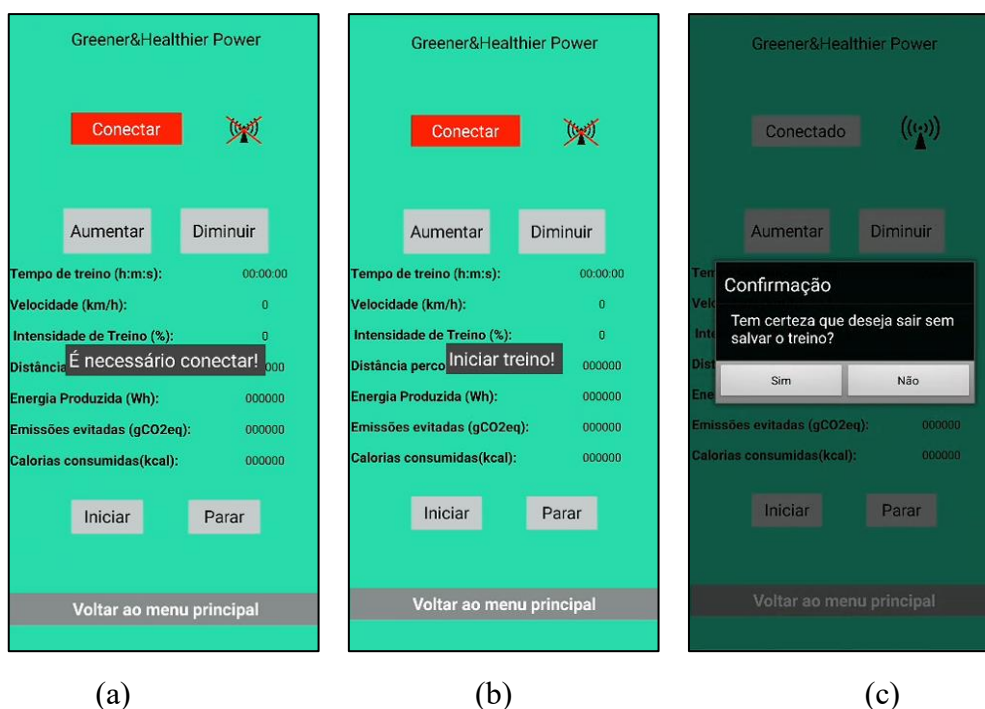


Figura 32 - Tela: "Treino com Controle Manual" - Lógica de utilização

### 3.4.7. Tela “Totalizador”

O objetivo da tela “Totalizador” (Figura 33 (a)) é fornecer os valores acumulados pelo usuário (tempo, distância, emissões evitadas, etc.) em toda sua trajetória de treino no sistema de colheita de energia.

Esta tela possui o botão “Limpar histórico” que a ser acionado exibe uma caixa de confirmação com a mensagem “Ao aceitar todos os dados serão apagados!” e as opções “Aceitar” e “Cancelar” (Figura 33 (b)). Ao apertar o botão “Aceitar” todos os dados registrados dos treinos serão apagados e será aberta a tela “Menu Principal”. Se o usuário apertar o botão “Cancelar” o aplicativo volta para a tela “Totalizador” em mantém o histórico.

O fluxograma da programação do aplicativo referente à esta tela encontra-se no Apêndice 13.

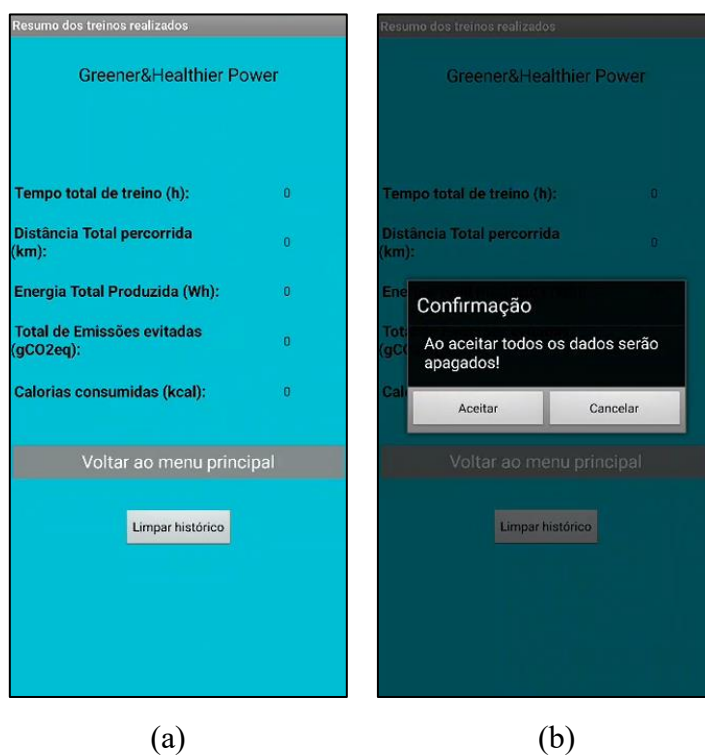
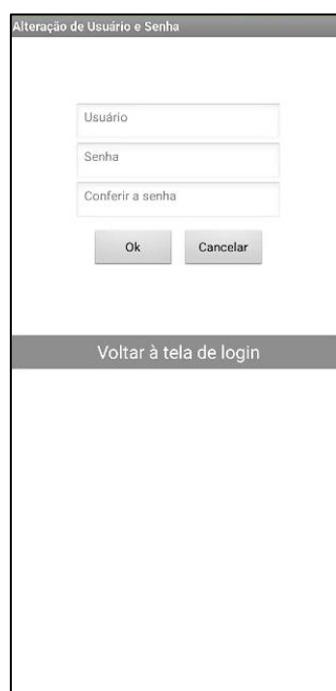


Figura 33 - Tela do aplicativo: "Totalizador"

### 3.4.8. Tela “Alteração de Usuário e Senha”

Caso o usuário queira alterar seu cadastro, a partir da tela “Menu Principal” ele pode acessar a tela “Alteração de Usuário e Senha” (Figura 34) e realizar suas modificações. Após a alteração o aplicativo volta automaticamente a tela de “Menu Principal”.

O Apêndice 14 exibe o fluxograma da programação desta tela no App Inventor.



A imagem mostra a interface de usuário para a alteração de dados pessoais. No topo, há um cabeçalho com o texto "Alteração de Usuário e Senha". Abaixo dele, há três campos de entrada de texto: "Usuário", "Senha" e "Conferir a senha". Cada campo possui uma seta de exclusão no canto superior direito. Abaixo dos campos, há dois botões: "Ok" e "Cancelar". Na base da tela, há uma barra cinza com o texto "Voltar à tela de login".

Figura 34 - Tela do aplicativo: "Alteração de Usuário e Senha"

### 3.4.9. Botão “Sair”

Ao ser pressionado o botão “Sair” da tela “Menu Principal”, o aplicativo *Greener&Healthier Power* será finalizado.

### 3.4.10. Cálculos utilizados no aplicativo GHP

O aplicativo GHP possui duas variáveis de entrada: Rotação do Eixo Intermediário II e quantidade de lâmpadas acesas durante à pratica da atividade. A partir desses valores são calculadas as demais variáveis que posteriormente são disponibilizadas ao usuário. Estes

cálculos são válidos tanto para as telas dos treinos pré-programados quanto para a tela do treino de controle manual. A programação completa da tela de treino pré-programado “Iniciante1” encontra-se no Apêndice 10 e da tela “Treino de Controle Manual” no Apêndice 12.

xix) Perímetro da circunferência externa de um pneu aro 26” ( $P_{pneu}$ )

$$P_{pneu} = \frac{\pi \cdot D_{pneu} \cdot 25,4}{1000} \quad (23)$$

Em que,  $P_{pneu}$  [m] é o perímetro do pneu e  $D_{pneu}$  [pol] é o diâmetro externo do pneu.

xx) Velocidade de uma bicicleta em função da rotação do eixo intermediário II ( $v_{bicicleta}$ )

$$v_{bicicleta} = \frac{\Omega_{eixo II}}{i_2} \cdot P_{pneu} \cdot \frac{60}{1000} \quad (24)$$

Em que,  $v_{bicicleta}$  [km/h] é a velocidade que teria uma bicicleta real (em função da rotação medida no eixo intermediário II),  $i_2$  é a relação de transmissão entre o eixo intermediário 1 (que é o eixo da roda traseira) e o eixo intermediário II,  $\Omega_{eixo II}$  [rpm] é a rotação do eixo intermediário II.

xxi) Distância percorrida ( $Dist_{percorrida}$ )

$$Dist_{percorrida} = \sum_{i=1}^n \frac{v_{bicicleta i}}{3600} \quad (25)$$

Em que,  $Dist_{percorrida}$  [km] é a somatória da velocidade instantânea a cada segundo de treino,  $v_{bicicleta}$  [km/h] é a velocidade que teria uma bicicleta real (em função da rotação do eixo intermediário II) e  $i$  é o instante de treino (a cada segundo) e  $n$  é o último instante de treino (no caso dos treinos pré-programados  $n = 1.800$ ).

xxii) Energia treinando ( $E_{trein\ i}$ )

Valor da energia treinando vai depender diretamente da intensidade de treino selecionado.

$$\begin{aligned}
 E_{trein1} &= -21,85 + 0,03618 \cdot \Omega_{eixo\ II} \\
 E_{trein2} &= -33,73 + 0,05391 \cdot \Omega_{eixo\ II} \\
 E_{trein3} &= -41,56 + 0,06147 \cdot \Omega_{eixo\ II} \\
 E_{trein4} &= -37,18 + 0,05768 \cdot \Omega_{eixo\ II} \\
 E_{trein5} &= -36,68 + 0,05619 \cdot \Omega_{eixo\ II}
 \end{aligned} \tag{26}$$

Em que,  $E_{trein\ i}$  [Wh] é a produção de energia a cada segundo de treino, o índice  $i$  (de 1 a 5) representa a intensidade de treino ativa no momento da geração e  $\Omega_{eixo\ II}$  [rpm] é a rotação do eixo intermediário II.

Obs.: Para rotações menores que 188,7 rpm no eixo intermediário II, a produção de energia  $E_{trein}$  será considerada igual a zero em qualquer intensidade de treino.

xxiii) Energia produzida no treino ( $E_{produzida}$ )

$$E_{produzida} = \sum_{i=1}^5 \frac{E_{trein\ i}}{3600} \tag{27}$$

Em que,  $E_{produzida}$  [Wh] é a somatória final de todos os valores de  $E_{trein}$  realizados durante o treino, é a energia produzida em todo o treino.

xxiv) Emissões Evitadas ( $EM_{evitadas}$ )

$$EM_{evitadas} = E_{produzida} \cdot FEE_{FCE} \tag{28}$$

Em que,  $EM_{evitadas}$  [g CO<sub>2</sub>-eq] é a quantidade de emissões evitadas no treino,  $FEE_{FCE}$  [kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh] é o fator de emissões evitadas pela FCE em relação a taxa de emissão do *mix* elétrico brasileiro e  $E_{produzida}$  [Wh] é a energia produzida em todo o treino.

xxv) Calorias Consumidas ( $C_{con}$ )

$$C_{con} = \frac{E_{produzida}}{\bar{\eta}_{globalt}} \quad (29)$$

Em que,  $C_{con}$  [kcal] é a quantidade de calorias consumidas pelo corpo para realizar o treino,  $\bar{\eta}_{globalt}$  [%] é a média do rendimento global entre todos os níveis de esforço de treino (Tabela 22) e  $E_{produzida}$  [Wh] é a energia produzida em todo o treino.

### 3.5. Análise Ambiental

O software SimaPro v.9.6.0.1 (SIMAPRO, 2025) foi utilizado para desenvolver a ACV, empregando a base de dados Ecoinvent 3.8 (ECOINVENT, 2018).

Devido às preocupações ambientais relacionadas à emissão de GEE, o método de avaliação de impacto ambiental selecionado foi o IPCC 2021 GWP 100y (IPCC, 2021). Este método agrupa as emissões de GEE e expressa o impacto em termos de uma métrica comum: equivalentes de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>-eq), considerando um horizonte temporal de 100 anos.

A unidade funcional utilizada neste estudo foi a quantidade de emissões de GEE associadas ao sistema de energia ao longo de sua vida útil de 10 anos (kg CO<sub>2</sub>-eq/ano).

Esta Avaliação de Ciclo de Vida considerará os limites "do berço ao túmulo" e assumirá que os materiais serão descartados em um aterro sanitário ao final de sua vida útil.

#### 3.5.1. Elaboração do inventário

Esta fase consiste na coleta de dados sobre entradas (matérias-primas, energia) e saídas (emissões, resíduos) para todos os processos dentro do limite do sistema.

Será elaborada uma lista de materiais e componentes de uma FCE, todos os itens

que serão inclusos nesta lista estão presentes na Figura 1.

Os itens que são contemplados pelo *software* SimaPro serão diretamente inseridos na análise, já os que não são contemplados serão convertidos em porcentagens de materiais de sua constituição e estes quantitativos de materiais é que serão inseridos no *software*.

As Tabelas 14 e 15 apresentam os componentes e materiais que compõe uma fazenda de colheita de energia (FCE).

Tabela 14 - Componentes que compõem uma FCE

Item	Componentes	Qtde	Composição material
1	Bicicletas	32	Alumínio 240,65 kg, Polietileno 62,40 kg, Poliuretano 0,96 kg, Aço Cromado 51,20 kg, Aço de Baixa Liga 156,80 kg, Borracha 17,92 kg
2	Cabos Elétricos 1,5 mm <sup>2</sup>	64 m	Cobre 0,96 kg, Polietileno 0,39 kg
3	Cabos Elétricos 1,0 mm <sup>2</sup>	32 m	Cobre 1,44 kg, Polietileno 0,46 kg
4	Conversor 12Vcc to 220Vca - 7000 W	1	Alumínio 0,273 kg, Cobre 1,07 kg, Poliestireno 0,059 kg, Aço de Baixa Liga 1,91 kg, Copolímero de estireno-acrilonitrila 0,002 kg, Lã de Polietileno 0,012 kg, Caixa de papelão ondulado 0,48 kg
5	Cabos Elétricos 25 mm <sup>2</sup>	10 m	Cobre 24 kg, Polietileno 3,7 kg
6	Cabos Elétricos 50 mm <sup>2</sup>	65,6 m	Cobre 48 kg, Polietileno 3,85 kg
7	Cabos Elétricos 70 mm <sup>2</sup>	12 m	Cobre 67,20 kg, Polietileno 2,7 kg
8	Cabos Elétricos 95 mm <sup>2</sup>	6 m	Cobre 86,40 kg, Polietileno 6,6 kg

Tabela 15 - Materiais que compõem uma FCE

Item	Material	Quantidade (kg)
9	Aço	226,2
10	Alumínio	74,0
11	Borracha	2,1
12	Cromo	0,8
13	Cobre	13,2
14	Estanho	0,8
15	Fibra de vidro	0,2
16	Graxa	0,5
17	Latão	1,8
18	Polímero	1,8
19	Resina epóxi	0,3
20	Silício	4,5
21	Zinco	0,5

### 3.5.2. Avaliação de Impacto Ambiental

Nesta etapa, através do *software* SimaPro, aplica-se um método de avaliação de impacto ambiental para traduzir os dados de inventário em um indicador ambiental desejado (que neste estudo será a pegada de carbono).

As emissões de GEE que resultarem desta fase será a variável Emissões de Geradas pela FCE em 10 anos ( $EG_{FCE}$ ) e será utilizada para a determinação da Taxa de Emissão da FCE ( $TE_{FCE}$ ).

### 3.5.3. Comparativo das emissões da FCE com *mix* Brasil

Para fins de comparação, o fator de emissão da FCE é comparado ao fator de emissão da matriz elétrica brasileira. O fator de emissão é um parâmetro frequentemente utilizado para comparar sistemas de energia, sendo calculado como a razão entre as emissões da geração de eletricidade (dados obtidos por meio de uma ACV) e a energia elétrica gerada, expresso em kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh.

O cálculo do fator de emissão associado ao consumo de eletricidade da rede seguiu

a metodologia de Carvalho e Delgado (2017), juntamente com os dados do Operador Nacional do Sistema (2024): hidrelétrica 62,18%, eólica 15,32%, solar 10,60%, biomassa 3,67%, gás natural 4,38%, nuclear 2,36%, carvão 1,30% e óleo 0,19%.

É importante ressaltar que os critérios utilizados para a obtenção, tanto do *mix* Brasil quanto da Fazenda de Colheita de Energia, foram os mesmos e que a ACV tem papel importante no sentido de equiparar as taxas de emissões destes diferentes sistemas de geração, proporcionando um comparativo mais justo.

### 3.5.4. Cálculo das Variáveis (Ambiental)

xxvi) Emissões de Geradas pela FCE em 10 anos ( $EG_{FCE}$ )

$$EG_{FCE} = \sum_{i=1}^n EG_{item\ i} \quad (30)$$

Em que,  $EG_{FCE}$  [kg CO<sub>2</sub>-eq] é a somatória das emissões de todos os componentes e materiais contidos na FCE utilizados em toda sua vida útil de 10 anos,  $EG_{item}$  [kg CO<sub>2</sub>-eq] é a emissão de cada componente ou material contido na FCE,  $i$  é o número de cada item da FCE e  $n$  é o número total de itens inclusos na ACV (neste estudo  $n = 21$ ).

xxvii) Taxa de Emissão da FCE ( $TE_{FCE}$ )

$$TE_{FCE} = \frac{EG_{FCE}}{FCE_{total}} \quad (31)$$

Em que,  $TE_{FCE}$  [kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh] é a taxa de emissão da FCE,  $EG_{FCE}$  [kg CO<sub>2</sub>-eq] é a somatória das emissões de todos os componentes e materiais contidos na FCE utilizados em toda sua vida útil de 10 anos e  $FCE_{total}$  [kWh/10 anos] é a capacidade de geração de energia elétrica de uma FCE durante 10 anos de produção.

xxviii) Emissões de GEE do Mix Brasil em 10 anos ( $Mix_{emissões}$ )

$$Mix_{emissões} = FCE_{total} \cdot TE_{mix} \quad (32)$$

Em que,  $Mix_{emiss\tilde{o}es}$  [kg CO<sub>2</sub>-eq] é o total de emissões da FCE em 10 anos,  $FCE_{total}$  [kWh/10 anos] é a capacidade de geração de energia elétrica de uma FCE durante 10 anos de produção e  $TE_{mix}$  [kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh] é a taxa de emissão do *mix* elétrico brasileiro.

xxix) Emissões Evitadas pelo FCE ( $EE_{FCE}$ )

$$EE_{FCE} = Mix_{emiss\tilde{o}es} - TE_{FCE} \quad (33)$$

Em que,  $EE_{FCE}$  [kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh] é a quantidade de emissões evitadas pela FCE em relação a taxa de emissão do *mix* elétrico brasileiro,  $Mix_{emiss\tilde{o}es}$  [kg CO<sub>2</sub>-eq] é o total de emissões da FCE em 10 anos e  $FCE_{emiss\tilde{o}es}$  [kg CO<sub>2</sub>-eq] é o total de emissões da FCE em 10 anos.

xxx) Fator de Emissões Evitadas pelo FCE ( $FEE_{FCE}$ )

Este parâmetro será utilizado especificamente no aplicativo GHP.

$$FEE_{FCE} = TE_{mix} - TE_{FCE} \quad (34)$$

Em que,  $FEE_{FCE}$  [kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh] é fator de emissões evitadas pela FCE em relação a taxa de emissão do *mix* elétrico brasileiro,  $TE_{mix}$  [kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh] é a taxa de emissão do *mix* elétrico brasileiro e  $TE_{FCE}$  [kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh] é a taxa de emissão do sistema.

xxxii) Emissões geradas pelo consumo alimentar médio per capita

Como citado anteriormente, a energia humana é “verde” de uma perspectiva científica e os estudos de ACV a consideram não poluente (JANSEN; STEVELS, 2006). Para efeito de análise, as emissões geradas pelo consumo alimentar médio de fontes de proteína per capita do brasileiro será admitido como o valor de referência para análise de emissões geradas por variações das fontes de proteínas de dietas alternativas. Estas emissões não serão inclusas nas emissões referentes à FCE, pois vale ressaltar que o mesmo praticante que está pedalando no sistema de colheita de energia, poderia estar pedalando em bicicletas sem colheita de energia.

Para a realização dos cálculos referentes à variação de consumo de proteína das dietas alimentares dos usuários do sistema *Greener&Healthier Power* serão seguidos os passos exibidos na Figura 35.

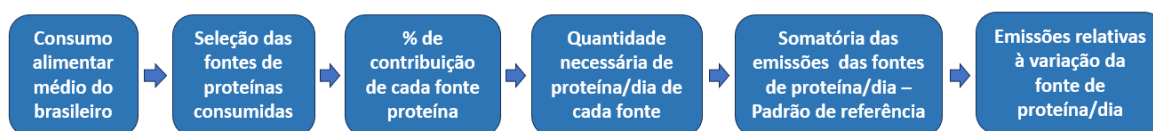


Figura 35 - Sequência de obtenção das emissões das variações de dietas

Serão utilizados os dados fornecidos em IBGE (2017) e inicialmente será analisado o consumo alimentar médio per capita (g/dia) do brasileiro, destes dados serão selecionadas somente as “fontes de proteínas” que fazem parte da alimentação diária (aves, carne bovina, feijão, etc.). A partir do consumo diário total das proteínas, será determinada a contribuição percentual de cada fonte.

A Figura 36 apresenta o percentual de participação das fontes de proteína no consumo alimentar diário per capita do brasileiro. Não serão contabilizados os alimentos que contém menores quantidades de proteínas e, portanto, não são classificados como fontes proteicas (arroz, pão, pizzas, etc.).

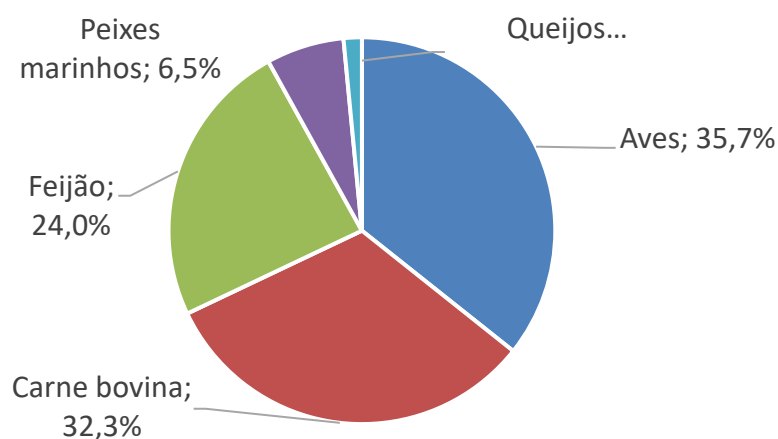


Figura 36 - Participação das fontes de proteína no consumo diário per capita do brasileiro  
Fonte: Adaptado de IBGE (2017)

A Tabela 16 exibe as fontes de proteína da dieta padrão e da variação da dieta, bem como seus respectivos índices.

Considerando-se que a prática de 30 minutos de bicicleta é um exercício de resistência aeróbica e cardiovascular, será adotada a taxa de ingestão de proteínas de 1,3 g/kg/dia (DALLMEYER; WICKER; BREUER, 2018), a partir desta taxa pode-se chegar à quantidade necessária de proteína/dia de cada fonte, que cada pessoa precisa ingerir em função do seu peso.

Tabela 16 - Relação de fontes de proteína

<b>Fonte de proteína da dieta padrão</b>	<b>Índice i</b>	<b>Fonte de proteína da variação da dieta</b>	<b>Índice j</b>
Aves	1	Whey Protein	1
Carne bovina	2	Ovo	2
Feijão	3	Tofu	3
Peixes marinhos	4	Proteína isolada de Soja	4
Queijos frescos	5	Concentrado de soja	5

A quantidade necessária de proteína/dia de cada fonte será inserida no inventário da ACV e suas emissões serão somadas. O resultado destas emissões será considerado como ponto de referência das emissões e será chamado de Emissões Geradas pela Dieta Padrão ( $EG_{padrdiet}$ ).

$$EG_{padrdiet} = \sum_{i=1}^n EG_{prot} \quad (35)$$

Em que,  $EG_{padrdiet}$  [kg CO<sub>2</sub>-eq] é a somatória das emissões de todas as fontes de proteína/dia,  $EG_{prot}$  [kg CO<sub>2</sub>-eq] é a emissão referente à quantidade necessária de proteína/dia de cada fonte,  $i$  é o índice de cada fonte de proteína (Tabela 16) e  $n$  é o número total de itens inclusos na ACV (neste caso  $n = 5$ ).

xxxii) Emissões Geradas pela Variação de Dietas ( $EG_{vardiet}$ )

$$EG_{vardiet} = EG_{padrdiet} - EG_{prot\ i} + EG_{prot\ j} \quad (36)$$

Em que,  $EG_{vardiet}$  [kg CO<sub>2</sub>-eq] é o valor das emissões geradas pela variação de dietas,  $EG_{padrdiet}$  [kg CO<sub>2</sub>-eq] é o valor das emissões geradas pela dieta padrão,  $EG_{prot\ i}$  [kg CO<sub>2</sub>-eq] é a emissão da quantidade necessária de cada fonte de proteína/dia,  $i$  é o índice de cada fonte de proteína da dieta padrão (Tabela 16) e  $j$  é o índice de cada fonte de proteína da variação de dieta (Tabela 16).

Para valores de  $EG_{vardiet} < EG_{padrdiet}$  a alteração da fonte de proteína será considerada vantajosa e para valores de  $EG_{vardiet} > EG_{padrdiet}$  a alteração da fonte de proteína será considerada desvantajosa.

Obs.: Os valores de  $EG_{vardiet}$  e  $EG_{padrdiet}$  foram criados apenas para que seja feita uma análise do impacto da variação de fonte de proteína ingerida pelos praticantes nas emissões de GEE. Estes valores não serão inclusos no inventário da FCE.

### 3.6. Potencial de redução de custo com Saúde Pública

A utilização do sistema *Greener&Healthier Power* tem dentre os seus objetivos incentivar as pessoas a praticarem atividades físicas. A utilização frequente do sistema resultará em melhores condições de saúde e de forma indireta pode contribuir para a redução de custos com Saúde Pública. O fato é que esta melhoria não pode ser avaliada de forma isolada, sendo que são vários os aspectos necessários para a melhoria das condições de saúde de uma pessoa e também para que ela possa se manter em uma boa forma física (alimentação, bom sono, motivação, etc.).

O objetivo deste item é fornecer parâmetros importantes para evidenciar possíveis benefícios financeiros que a utilização das FCEs possa trazer e com isso despertar o interesse do poder público e da iniciativa privada para que as FCEs possam ser implementadas.

O potencial de redução de custo com Saúde Pública através da implementação das FCEs, levará em consideração os seguintes itens:

- Estimativa de valor gerado com a colheita de energia das FCEs;
- Investimento necessário para que as FCEs possam ser instaladas e abrangência do projeto;

- Potencial de redução de custos com Saúde Pública, em função da melhoria das condições de saúde da população.

Portanto, será necessário avaliar qual será o investimento necessário para contemplar uma parcela da população, com a possibilidade de prática de atividades físicas e posteriormente colher os frutos da melhora da saúde da população, especialmente o potencial de redução dos custos com Saúde Pública.

### **3.6.1. Investimentos necessários para instalação de uma FCE e abrangência do projeto**

Para que o valor total necessário para a instalação de uma FCE seja estimado, primeiramente será realizada a estimativa de custo de um SCE individualmente, contendo os custos de todos os componentes e mão-de-obra necessária para a montagem do sistema.

Na segunda etapa os valores das SCEs serão multiplicados por 32 unidades e ainda haverá a inclusão dos itens comuns a todo o sistema, tais como cabos elétricos, conversor CC/CA, etc.

### **3.6.2. Estimativa de valor gerado com a colheita de energia de uma FCE**

A estimativa de valor gerado através da colheita de energia de uma FCE será calculada a partir de capacidade de colheita de energia de uma FCE em 1 ano ( $FCE_{anual}$  - Equação 19), multiplicada pelo valor médio da taxa de R\$/kWh (em bandeira verde) para os estados com a maior (Pará – R\$ 0,97830/kWh) (EQUATORIAL ENERGIA - PA, 2026) e com a menor taxa (Paraíba – R\$ 0,57492/kWh) (ENERGISA PARAÍBA, 2025) praticada no Brasil.

### **3.6.3. Potencial de redução de custos com Saúde Pública, em função da melhoria das condições de saúde da população.**

Serão selecionados artigos científicos que abordem a relação entre a porcentagem da população que passe a praticar atividades regulares e conseqüentemente possa contribuir para a redução de custos com Saúde Pública.

Os valores de investimento para promover à prática das atividades físicas e do possível retorno com a redução de custos serão adaptados para a realidade da implementação das FCEs para que se possa ter um parâmetro comparativo.

Os valores encontrados poderão indicar o possível potencial de redução de custos com Saúde Pública em função da implementação do sistema.

### **3.7. Um Protocolo de Ensaio Randomizado Controlado Cego: Avaliando o Impacto de Bicicletas Estacionárias Geradoras de Energia na Saúde Cardiovascular**

Este protocolo é referente ao estudo de avaliação do impacto que a utilização das FCEs pode exercer na saúde cardiovascular dos praticantes que utilizarem o sistema de forma regular. Este projeto já foi iniciado, está em fase de formalização perante aos órgãos competentes e futuramente serão realizados os procedimentos abaixo descritos.

#### **3.7.1. Desenho do Estudo e Participantes**

Este é um ensaio clínico randomizado, controlado e cego, no qual serão recrutados 96 adultos sedentários, com idades entre 18 e 60 anos, Índice de Massa Corporal (IMC) entre 25 e 35 kg/m<sup>2</sup> e sem histórico prévio de doença cardiovascular diagnosticada. Os participantes serão alocados aleatoriamente em três grupos, cada um composto por 32 indivíduos: o Grupo de Intervenção (GI), que participará do programa de ciclismo *indoor* sem geração de energia (GI1) e com geração de energia (GI2), recebendo também orientações sobre atividade física e hábitos saudáveis, e o Grupo Controle (GC), que continuará suas atividades diárias habituais durante todo o período do estudo, sem receber qualquer intervenção ou programa de exercícios estruturado.

O GI1 permitirá a avaliação dos efeitos diretos do exercício aeróbico estruturado na saúde cardiovascular e parâmetros relacionados, independentemente da produção de energia ou da orientação educacional. O GI2 visa avaliar os efeitos sinérgicos do exercício, da

conscientização sobre energia e da educação em saúde. A GC serve como referência para identificar variações naturais nos parâmetros cardiovasculares e metabólicos ao longo do tempo, na ausência de modificação do estilo de vida.

### 3.7.2. Intervenção

A intervenção será baseada no uso de bicicletas especialmente adaptadas para a captação de energia. As Figuras 1 e 37 ilustram o equipamento e sua configuração em escala coletiva. O projeto baseia-se na conversão da energia mecânica gerada pela pedalada em eletricidade por meio de um sistema que integra uma transmissão mecânica a um gerador elétrico. A eletricidade produzida pode ser utilizada diretamente no local — por exemplo, para alimentar equipamentos de ginástica — ou, alternativamente, injetada na rede elétrica.

A Figura 37 mostra o design individual da bicicleta, destacando os componentes destinados à geração de eletricidade. A Figura 1 ilustra a FCE com 32 unidades interconectadas, que permite a prática simultânea de exercícios e produção de energia. Este arranjo técnico será empregado em todo o programa de ciclismo *indoor*, servindo como recurso central da intervenção proposta.

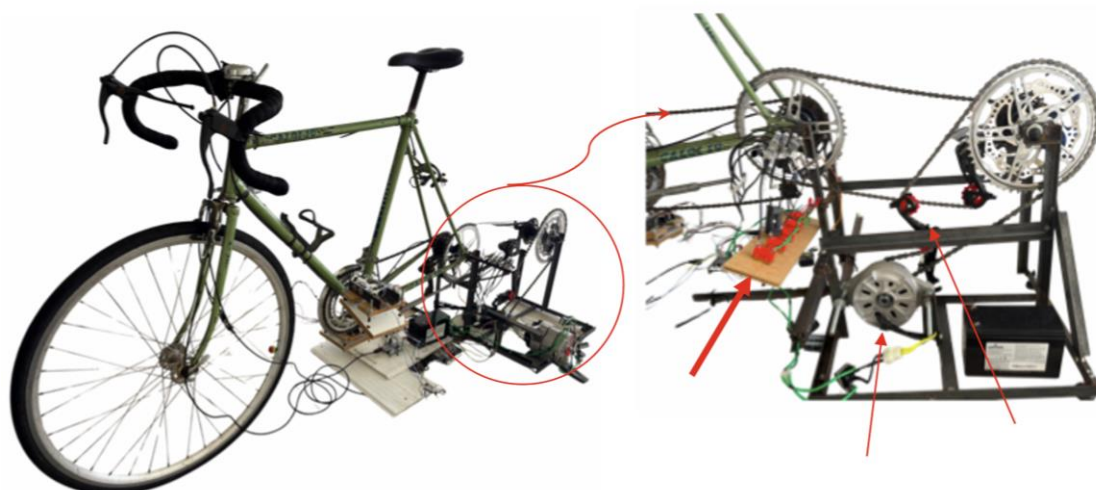


Figura 37 - Sistema de coleta de energia de bicicletas - a instalação Greener&Healthier Power. Fotografia tirada e editada por Inès Delesalle. Usada com permissão.

Além de sua base técnica, há uma abordagem conceitual inovadora. O ciclismo *indoor* convencional dissipa energia como calor sem recuperação; em contraste, este sistema captura essa energia e a converte em eletricidade utilizável. O sistema busca, portanto, um duplo objetivo: por um lado, valorizar a energia humana por meio da geração de eletricidade e, por outro, promover estilos de vida mais saudáveis, estabelecendo uma conexão tangível entre o esforço físico individual e os benefícios coletivos. Ao fazer isso, ele reformula os usuários não apenas como consumidores de energia, mas também como contribuintes ativos para a transição energética.

Utilizam-se como base a aplicação da análise de exergia em sistemas biológicos para identificar indicadores relacionados ao conforto térmico, à saúde humana e ao desempenho físico (IGARASHI et al., 2022; MADY et al., 2019). Nesse sentido, a compreensão da produção de energia e da eficiência energética do corpo humano é essencial. A Equação (37) expressa a variação da energia corporal ao longo do tempo, em que  $M$  é o metabolismo durante o teste (kJ),  $W$  é o trabalho realizado (efeito útil) (kJ),  $E_{env}$  é a transferência de energia para o ambiente associada à convecção, radiação e suor (kJ) e  $dU_{corpo}/dt$  é a variação da energia do corpo ao longo do tempo.

$$\frac{dU_{corpo}}{dt} = (M - W) - E_{env} \quad (37)$$

A Equação (38) apresenta a eficiência energética do corpo humano ( $\eta_{corpo}$ ), que durante o exercício de ciclismo é de aproximadamente 30% (MADY et al., 2019), permitindo que sejam estabelecidas correlações entre o gasto metabólico e o potencial de conversão em eletricidade.

$$n_{corpo} = \frac{W}{M} \quad (38)$$

Em sistemas de coleta de energia baseados em ciclismo estacionário, um gerador é empregado para transformar o movimento mecânico produzido pela pedalada — quantificado como rotação (rpm) e torque no pedivela (Nm) — em energia elétrica. O processo de conversão global do sistema opera com uma eficiência de aproximadamente

11,5% (vide item 4.1.4), o que influencia diretamente o rendimento energético geral do sistema e constitui um parâmetro crítico para avaliar seu desempenho técnico.

Para um teste de um paciente submetido a 20 minutos de treinamento, o metabolismo integrado ao longo do teste foi de 850,1 kJ, o trabalho realizado foi de 255,0 kJ, o consumo de glicose foi de 0,0544 kg e o CO<sub>2</sub> produzido pelas atividades metabólicas foi de 0,0133 kg (IGARASHI et al., 2022; MADY et al., 2019). No entanto, é essencial enfatizar que a pegada de carbono associada à respiração humana não precisa ser considerada, visto que CO<sub>2</sub> exalado faz parte do ciclo biogeoquímico do carbono, no qual as plantas absorvem CO<sub>2</sub> da atmosfera e incorporam o carbono em sua biomassa. Esse carbono é transferido pela cadeia alimentar e posteriormente retorna à atmosfera por meio da respiração, caracterizando um ciclo natural entre biosfera e atmosfera, sendo considerado carbono neutro (SCHULTZ; MADY; CARVALHO, 2024; MIT CLIMATE PORTAL, 2024).

A aplicação do conceito de exergia na análise do desempenho atlético possibilitou o desenvolvimento de índices baseados na termodinâmica do corpo humano, permitindo comparações com parâmetros médicos bem estabelecidos, como o consumo máximo de oxigênio e o limiar de lactato, que apresentaram correlações promissoras na literatura (MADY et al., 2013). A mesma lógica pode ser estendida à avaliação de índices de conforto térmico, à análise exérgica do corpo humano e ao estudo de edifícios ocupados por diferentes grupos populacionais em contextos de uso racional de energia (MOLLIET; MADY, 2021).

Propõe-se então, com base em uma análise de características individuais, indicadores que podem auxiliar os formuladores de políticas, integrando princípios termodinâmicos à discussão sobre eficiência energética e a pegada de carbono associada às soluções propostas (SCHULTZ; MADY; CARVALHO, 2024).

Em relação à produção de eletricidade pelo sistema de coleta de energia, testes de ciclismo de 20 minutos alcançaram uma geração de energia de 223,7 kJ por ciclista (IGARASHI et al., 2022; MADY et al., 2019). Deve-se destacar que a OMS recomenda a prática de 150 minutos por semana de atividade física de intensidade moderada a vigorosa (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2025).

Para avaliar os efeitos do programa proposto, os participantes serão alocados em dois grupos distintos de acordo com o tipo de equipamento utilizado. Essa divisão permitirá comparações não apenas dos resultados fisiológicos, mas também de aspectos relacionados à motivação e aos benefícios percebidos, considerando a presença ou ausência de tecnologia de geração de energia integrada às bicicletas.

Grupo de Intervenção (GI): Os participantes participarão de um programa de ciclismo *indoor* de 12 semanas, composto por três sessões de 45 minutos por semana. As atividades serão supervisionadas por profissionais de Educação Física, com intensidade progressiva e monitoramento contínuo da frequência cardíaca. No GI2, as bicicletas utilizadas serão equipadas com um sistema de captação de energia. A eletricidade gerada durante os testes será consumida no ambiente de treinamento, contribuindo assim para a redução do impacto ambiental. Enquanto o GI1 isola os benefícios do exercício aeróbico isoladamente, o GI2 examina se a integração da geração de energia e do aconselhamento comportamental melhora os resultados cardiovasculares e a consciência ambiental.

Grupo de Controle (GC): Estabelece uma linha de base para a variabilidade fisiológica natural. Este grupo serve como comparador de referência para os dois grupos de intervenção (GI1 e GI2), permitindo a avaliação de alterações fisiológicas e metabólicas que podem ocorrer naturalmente ao longo do tempo, sem influência externa. O monitoramento deste grupo é essencial para diferenciar os efeitos derivados da própria intervenção daqueles resultantes da variabilidade biológica normal ou de fatores de estilo de vida não controlados.

### **3.7.3. Procedimentos**

O recrutamento dos participantes será realizado por meio da divulgação de informações nas redes sociais e na mídia local, seguindo critérios explícitos de inclusão e exclusão. Antes do início do estudo, todos os voluntários deverão assinar um termo de consentimento livre e esclarecido.

Na avaliação inicial, serão coletados dados demográficos e histórico de saúde, juntamente com exames físicos e laboratoriais necessários para a obtenção das variáveis dependentes. Os participantes serão então alocados aleatoriamente ao grupo de intervenção

(GI) ou ao grupo controle (GC) utilizando um software específico, garantindo o equilíbrio entre os grupos e a aleatoriedade na distribuição.

A intervenção consistirá na implementação do programa de ciclismo *indoor* para o GI, enquanto o GC realiza suas atividades rotineiras habituais. O acompanhamento incluirá o monitoramento da adesão ao programa no GI e contato telefônico mensal com ambos os grupos para reforçar as recomendações e esclarecer dúvidas. Ao final das 12 semanas, as avaliações físicas e laboratoriais serão repetidas para verificar possíveis alterações nos resultados.

#### **3.7.4. Variáveis**

A variável independente de interesse será a participação no programa de ciclismo *indoor* com geração de energia e orientação em saúde (GI2) em comparação com a participação apenas nas sessões de ciclismo *indoor* (GI1) e com o grupo controle (GC). As variáveis dependentes incluirão: pressão arterial sistólica e diastólica (mmHg), medidas em repouso com um esfigmomanômetro calibrado; frequência cardíaca em repouso (bpm), registrada após 10 minutos de repouso; colesterol total, colesterol HDL, colesterol LDL e triglicérides (mg/dL), avaliados em amostras de sangue venoso após um jejum de 12 horas, com o LDL calculado usando a fórmula de Friedewald (quando os triglicérides forem < 400 mg/dL) ou medido diretamente; glicemia de jejum (mg/dL), também obtida por meio de exame laboratorial de sangue venoso após um jejum de 12 horas; circunferência da cintura (cm), medida com uma fita métrica inextensível no ponto médio entre a crista ilíaca e a última costela; e  $VO_2$  máx (ml/kg/min), estimado por meio de um teste submáximo em cicloergômetro ou esteira, usando um protocolo validado.

Adicionalmente, variáveis de controle independentes, incluindo sexo, idade, peso, altura e IMC, serão registradas.

#### **3.7.5. Análise Estatística**

Testes estatísticos apropriados serão aplicados para comparar as variáveis dependentes entre o grupo de intervenção (GI) e o grupo controle (GC) tanto no início quanto no final do estudo. Para a comparação de médias e medianas, serão utilizados o teste t de

*Student* ou o teste de Mann-Whitney, respectivamente, enquanto as proporções serão analisadas utilizando o teste qui-quadrado. Além disso, uma Análise de Covariância (ANCOVA) será conduzida para ajustar os resultados para potenciais diferenças basais entre os grupos. O nível de significância será definido em  $p < 0,05$ .

### **3.7.6. Considerações Éticas**

O estudo será conduzido de acordo com os princípios éticos descritos na Declaração de Helsinque e terá obtido aprovação prévia do Comitê de Ética em Pesquisa da instituição responsável. Todos os participantes receberão informações detalhadas sobre os objetivos, procedimentos, riscos e benefícios potenciais do estudo e serão incluídos somente após assinarem o termo de consentimento livre e esclarecido. A confidencialidade das informações será assegurada em todas as etapas do estudo, e o protocolo será devidamente registrado na Plataforma Brasil.

### **3.7.7. Resultados Esperados**

A iniciativa *Greener&Healthier Power* integra uma perspectiva socioambiental, abordando simultaneamente a conscientização sobre energia e a saúde pública. Como ferramenta educacional, permite que os indivíduos visualizem o esforço físico necessário para gerar eletricidade, promovendo assim uma maior conscientização sobre a eficiência energética e o consumo responsável. Além da sua dimensão ambiental, a iniciativa também promove benefícios para a saúde, incentivando a prática regular de ciclismo *indoor*, o que pode contribuir para a prevenção de doenças crônicas como doenças cardiovasculares, diabetes e obesidade. Dessa forma, não só apoia o bem-estar da população, como também tem o potencial de reduzir os custos com saúde.

A partir da intervenção proposta, espera-se que o GI2 apresente melhorias estatisticamente significativas em comparação com o GI1 e o GC nos indicadores cardiovasculares avaliados, incluindo reduções na pressão arterial, frequência cardíaca em repouso, colesterol total, colesterol LDL, triglicerídeos, glicemia em jejum e circunferência da cintura, bem como um aumento no  $VO_2$  máx.

Ademais, prevê-se que os resultados forneçam evidências científicas robustas sobre os efeitos benéficos do ciclismo *indoor* na saúde cardiovascular, combinadas com os potenciais ganhos ambientais derivados da geração de energia renovável durante as sessões. O GI1 ajuda a controlar os fatores psicológicos e motivacionais — uma vez que tanto o GI1 quanto o GI2 participam das mesmas sessões estruturadas de ciclismo, quaisquer diferenças na adesão, no prazer ou no desempenho podem ser atribuídas ao componente motivacional adicional da geração de energia ou da orientação no GI2.

Dessa forma, o estudo pode apoiar políticas públicas e programas de promoção da saúde que integrem a prevenção de doenças cardiovasculares com o incentivo a estilos de vida mais ativos e sustentáveis, em consonância com os princípios do conceito de Saúde Única.

## CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Geração de Energia

#### 4.1.1. 1º procedimento de testes

Antes de realizar a regressão linear, foram realizados procedimentos de validação dos dados.

A partir dos resultados dos testes do 1º procedimento foi possível analisar, para os 5 diferentes níveis de produção, o comportamento da variável Potência Coletada ( $P_{col\ ij}$ ) e Potência no Pedivela ( $P_{pediv\ ij}$ ) em função da variável Rotação do alternador ( $\Omega_{alt\ ij}$ ).

Os resultados da Tabela 17 demonstram que a correlação entre todos os valores de  $P_{col}$  e  $\Omega_{alt}$  é forte positiva e a correlação entre todos os valores de  $P_{pediv}$  e  $\Omega_{alt}$  também é forte positiva. Uma coluna de *p-value* foi adicionada a tabela, lembrando que para *p-value* < 0,05 o resultado é considerado estatisticamente significativo, evidenciando que a rotação do alternador ( $\Omega_{alt}$ ) tem relação com as potências coletada ( $P_{col}$ ) e do pedivela ( $P_{pediv}$ ).

Outro fator importante a ser avaliado é o fator de impacto que a variável preditora (rotação do alternador) tem sobre a resposta, os gráficos apresentados na Figura 38 representam os efeitos dessas variáveis.

Tabela 17 - Tipo de correlação entre variáveis

Variável de Resposta	Variável Preditora	Coefficiente r	Tipo de Correlação	<i>p-value</i>
$P_{col11}$	$\Omega_{alt11}$	0,996	Forte Positiva	0,000
$P_{pediv11}$	$\Omega_{alt11}$	0,994	Forte Positiva	0,000
$P_{col12}$	$\Omega_{alt12}$	0,991	Forte Positiva	0,000
$P_{pediv12}$	$\Omega_{alt12}$	0,990	Forte Positiva	0,000
$P_{col13}$	$\Omega_{alt113}$	0,996	Forte Positiva	0,000
$P_{pediv13}$	$\Omega_{alt113}$	0,973	Forte Positiva	0,000
$P_{col14}$	$\Omega_{alt14}$	0,991	Forte Positiva	0,000
$P_{pediv14}$	$\Omega_{alt14}$	0,985	Forte Positiva	0,000
$P_{col15}$	$\Omega_{alt15}$	0,983	Forte Positiva	0,000
$P_{pediv15}$	$\Omega_{alt15}$	0,992	Forte Positiva	0,000

Para facilitar a interpretação, na Figura 38 foram mantidos os mesmos valores de limites (inferior e superior) dos eixos x e y para todos os gráficos de  $P_{col}$  e  $P_{pediv}$ . Pode-se perceber que a variável  $\Omega_{alt}$ , mesmo com a variação do número de lâmpadas, manteve um fator de impacto semelhante (inclinação da reta) tanto nas variáveis  $P_{col}$  e  $P_{pediv}$ .

O Teste de Anderson-Darling, foi utilizado com a finalidade de se verificar a normalidade dos dados das variáveis de resposta, sendo necessária para este teste a condição  $p\text{-value} > 0,05$  para garantir a normalidade dos dados (Tabela 18).

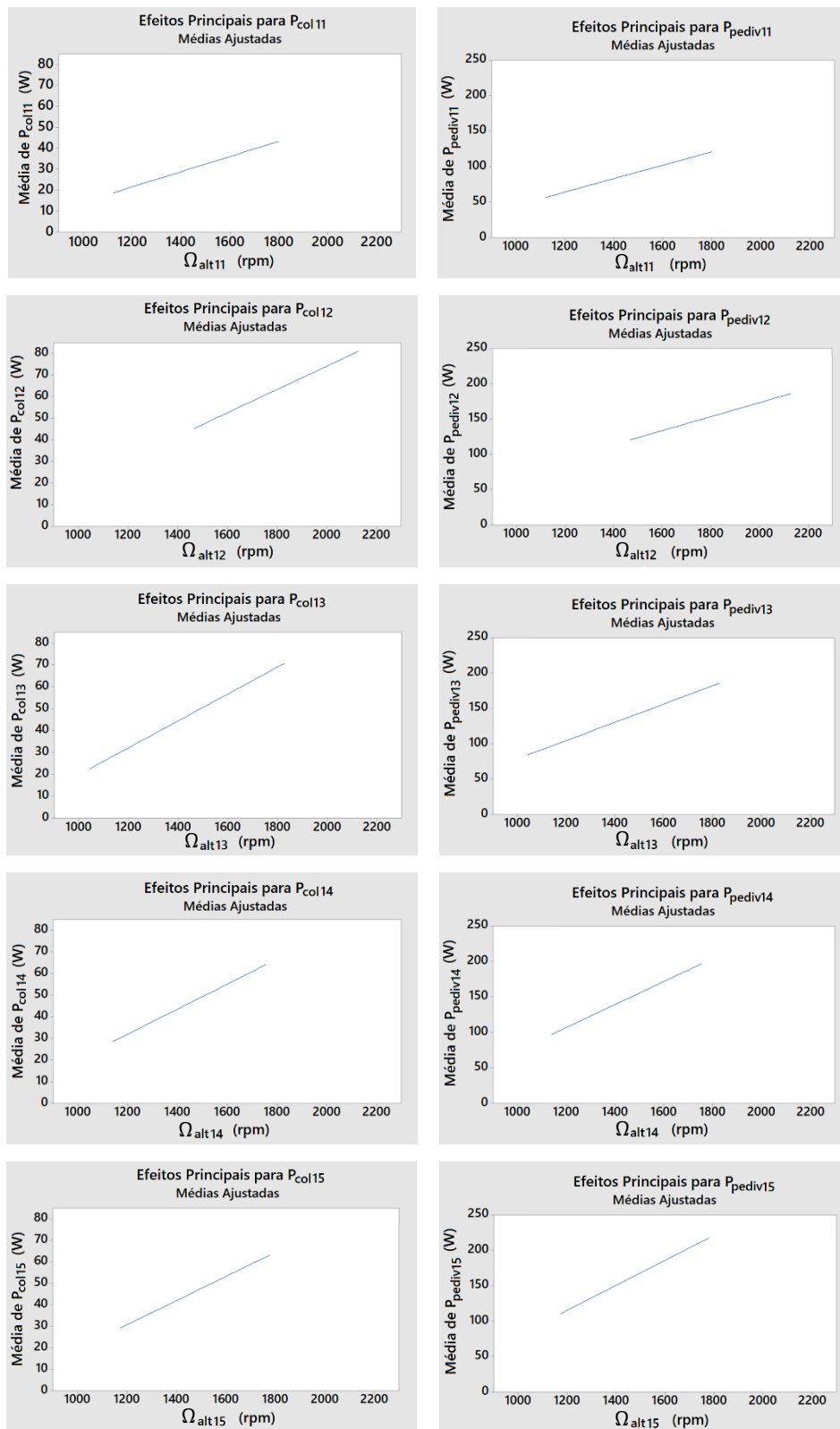


Figura 38 - Gráficos de efeitos principais

Tabela 18 - Teste de Normalidade de Anderson-Darling ( $p\text{-value} > 0,05$ )

Variável de Resposta	$p\text{-value}$
P <sub>col11</sub>	0,940
P <sub>pediv11</sub>	0,336
P <sub>col12</sub>	0,255
P <sub>pediv12</sub>	0,602
P <sub>col13</sub>	0,416
P <sub>pediv13</sub>	0,856
P <sub>col14</sub>	0,838
P <sub>pediv14</sub>	0,171
P <sub>col15</sub>	0,694
P <sub>pediv15</sub>	0,546

Após validar os dados através do coeficiente  $r$ , de  $p\text{-value}$ , do fator de impacto e Teste de Anderson-Darling e com a finalidade de se determinar as equações de geração para cada nível de geração, realizou-se o método de regressão linear através *software* Minitab® na Versão 17.10. Os gráficos gerados são apresentados na Figura 39.

Todas as amostras obtiveram  $R\text{-}Sq_{(adj)}$  acima de 94%, o que garante a qualidade do ajuste de regressão linear, os gráficos de normalidade de resíduos de todas as amostras encontram-se no Apêndice 15.

A Tabela 19 apresenta as equações das curvas de geração para os diferentes níveis. Estas curvas serviram de base para o cálculo de produção de energia do SCE e da FCE. Estas fórmulas foram inseridas no aplicativo GHP e são base de cálculo para os treinos.

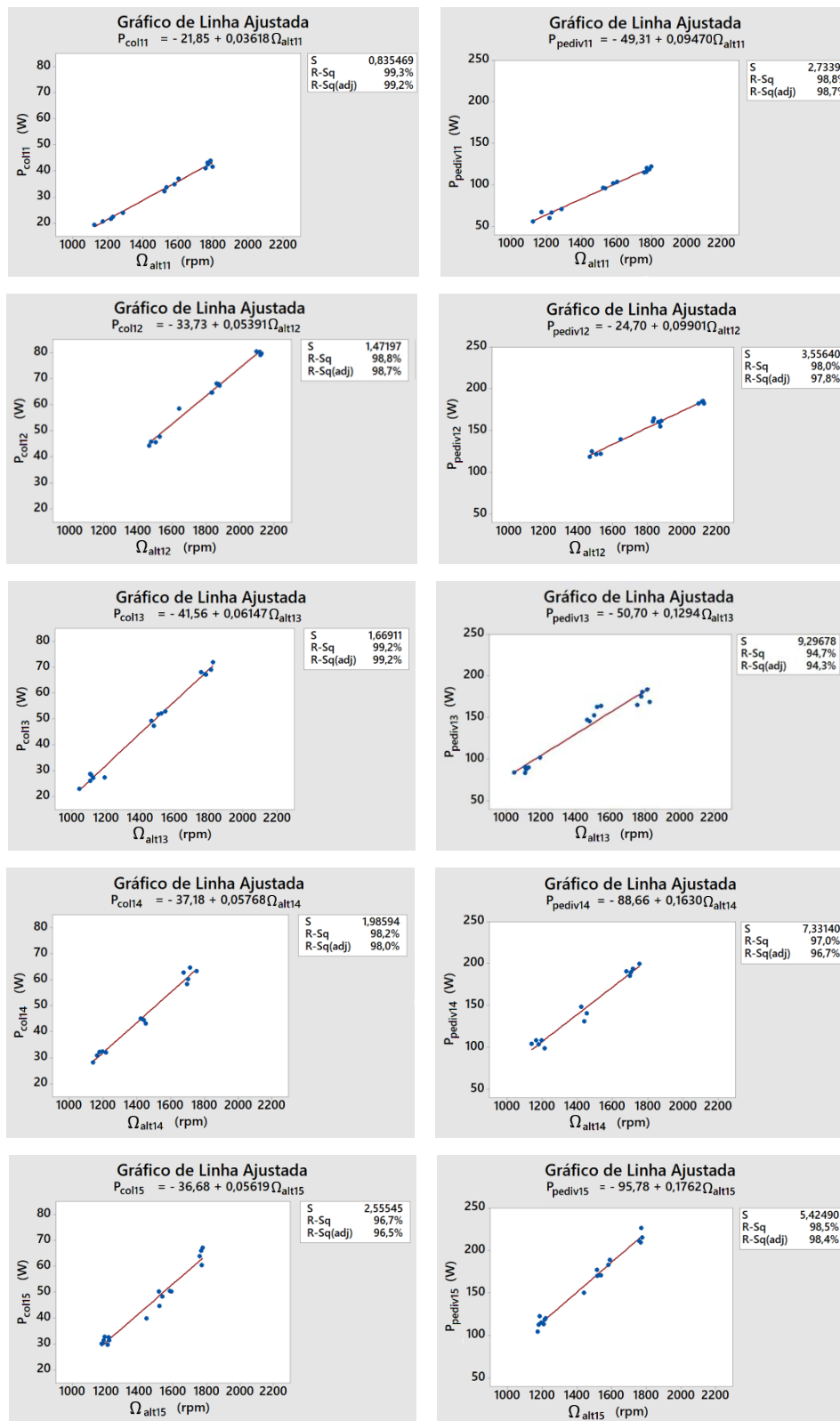


Figura 39 - Regressão - Gráficos de linha ajustada

Tabela 19 - Equações das curvas de geração

No. de lâmpadas	Equações
1	$P_{col11} = - 21,85 + 0,03618 \cdot \Omega_{alt11}$
	$P_{pediv11} = - 49,31 + 0,0947 \cdot \Omega_{alt11}$
2	$P_{col12} = - 33,73 + 0,05391 \cdot \Omega_{alt12}$
	$P_{pediv12} = - 24,70 + 0,09901 \cdot \Omega_{alt12}$
3	$P_{col13} = - 41,56 + 0,06147 \cdot \Omega_{alt13}$
	$P_{pediv13} = - 50,70 + 0,1294 \cdot \Omega_{alt13}$
4	$P_{col14} = - 37,18 + 0,05768 \cdot \Omega_{alt14}$
	$P_{pediv14} = - 88,66 + 0,1630 \cdot \Omega_{alt14}$
5	$P_{col15} = - 36,68 + 0,05619 \cdot \Omega_{alt15}$
	$P_{pediv15} = - 95,78 + 0,1762 \cdot \Omega_{alt15}$

A presença de valores negativos nas equações, pode sugerir que a potência seja negativa para valores mais baixos de rotação do alternador (<700 rpm). Os testes foram realizados numa faixa de rotação do alternador que variou entre 1.000 e 2.2000 rpm, para esta faixa, as simulações de regressão linear apresentaram melhores parâmetros de validação para equações de 1º grau.

É provável que se fossem realizados testes com rotações menores que 1.000 rpm as equações de 2º grau pudessem se tornar mais favoráveis que as de 1º grau e eliminassem a presença dos fatores negativos das equações. Os testes em rotações abaixo de 1.000 rpm não foram realizados por não apresentar potencial de geração de colheita de energia, nesta faixa de rotação, os valores de tensão e corrente ficam muito baixos, o que resulta numa potência de colheita de energia muito próxima ao zero.

#### 4.1.2. 2º procedimento de testes

Os resultados obtidos no 2º procedimento de testes são demonstrados na Figura 40.

Pode-se notar que, com o aumento dos níveis de produção, houve também o aumento da  $F_{total}$  necessária para gerar energia. Considerando-se que o nível 0, com força total média de 23,6 kgf, seja a intensidade mínima de esforço de geração (0%) e que seja o nível 5 com força total média de 42,4 kgf, a intensidade máxima de esforço de geração (100%), a Tabela 20 mostra os valores médios do percentual de intensidade de esforço de cada nível. A intensidade de esforço é um parâmetro que será utilizado no aplicativo GHP e é considerado um grande diferencial deste estudo, pois é este parâmetro que vai permitir a variação de esforço durante o treino, simulando subidas com mais ou menos intensidade.

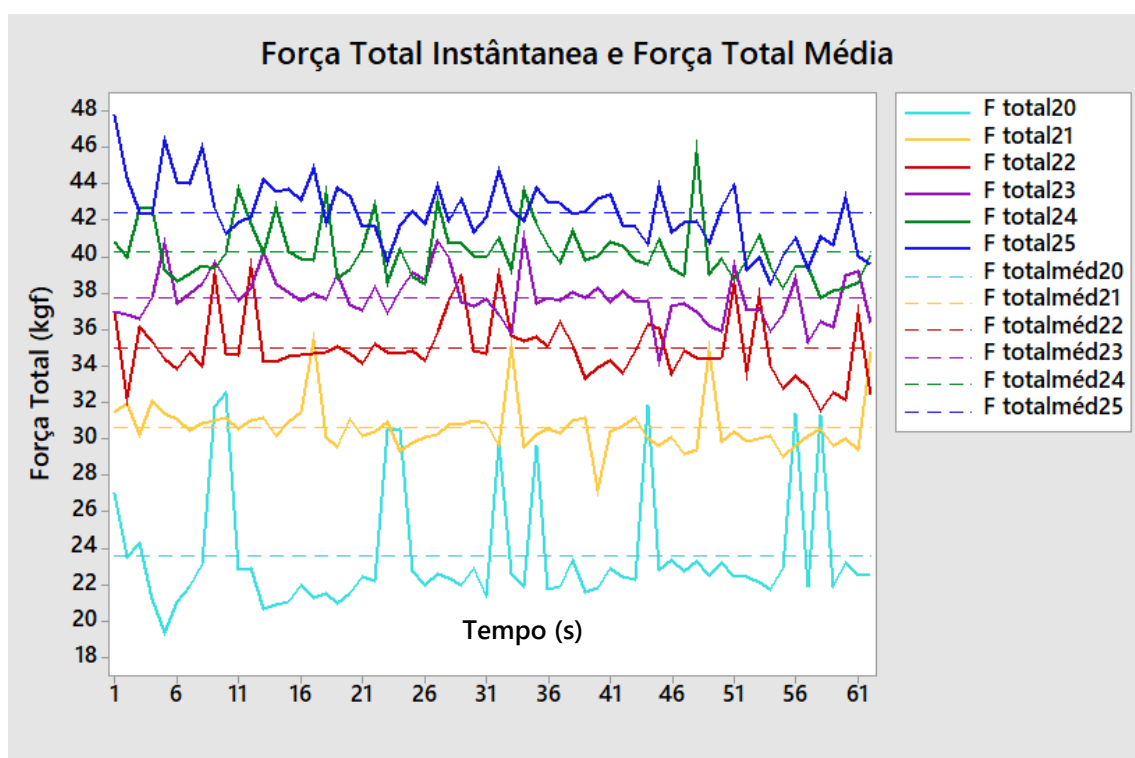


Figura 40 - Força Total Instantânea e Força Total Média em função do tempo.

Tabela 20 - Força Total Média e Número de lâmpadas

Nível de Geração (No. lâmps)	Força Total Média [kgf]	Intensidade de Esforço
0	23,6	0,0%
1	30,7	37,7%
2	35,0	60,4%
3	37,8	75,4%
4	40,3	88,7%
5	42,4	100,0%

Portanto, o aumento do número de lâmpadas consumidoras aumenta o esforço necessário para acionar o pedivela, porém é importante destacar que o valor deste acréscimo diminui proporcionalmente a cada lâmpada adicionada.

A Tabela 21 apresenta a análise do Coeficiente  $r$  e de  $p$ -value, a partir dos valores de força total média da Tabela 20.

A correlação entre  $F_{total}$  e  $N_{lâmps}$  é forte positiva e com  $p$ -value  $< 0,05$  o resultado é considerado estatisticamente significativo. O Teste de Anderson-Darling, foi utilizado com a finalidade de se verificar a normalidade dos dados das variáveis de resposta e foi obtido  $p$ -value = 0,335, lembrando que para este teste é necessária a condição  $p$ -value  $> 0,05$  para garantir a normalidade dos dados.

Tabela 21 - Tipo de correlação entre variáveis

Variável de Resposta	Variável Preditora	Coeficiente $r$	Tipo de Correlação	$p$ -value
$F_{total}$	$N_{lâmps}$	0,971	Forte Positiva	0,001

O gráfico de efeito principal da Figura 41 mostra o impacto significativo que o número de lâmpadas tem sobre a força total.

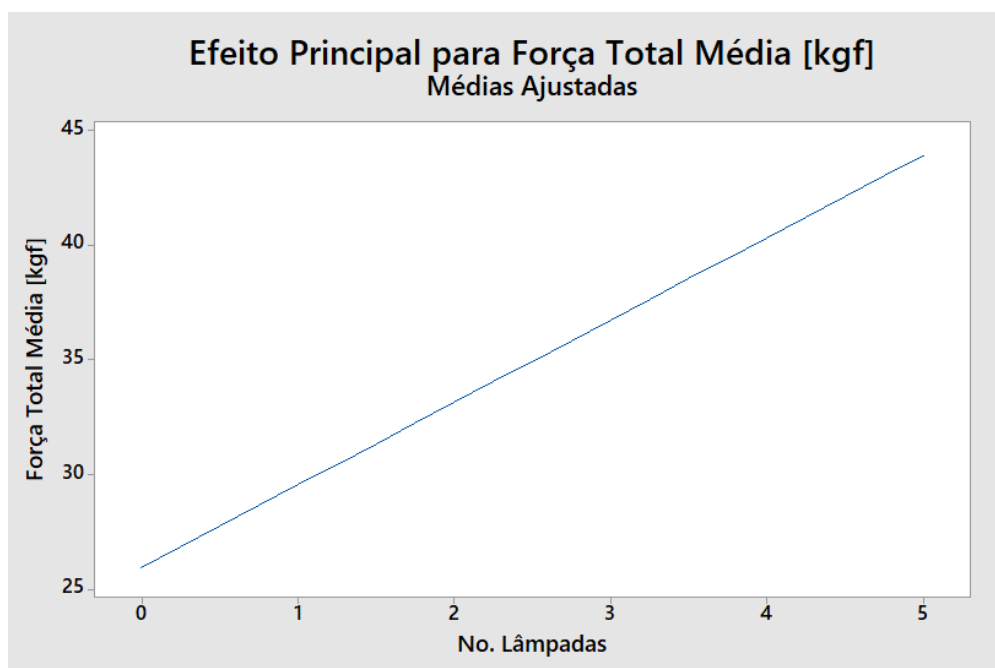


Figura 41 - Gráfico de efeito principal

A regressão linear de modelo quadrático foi realizada no *software* Minitab® na Versão 17.10 para gerar a curva apresentada na Figura 42.

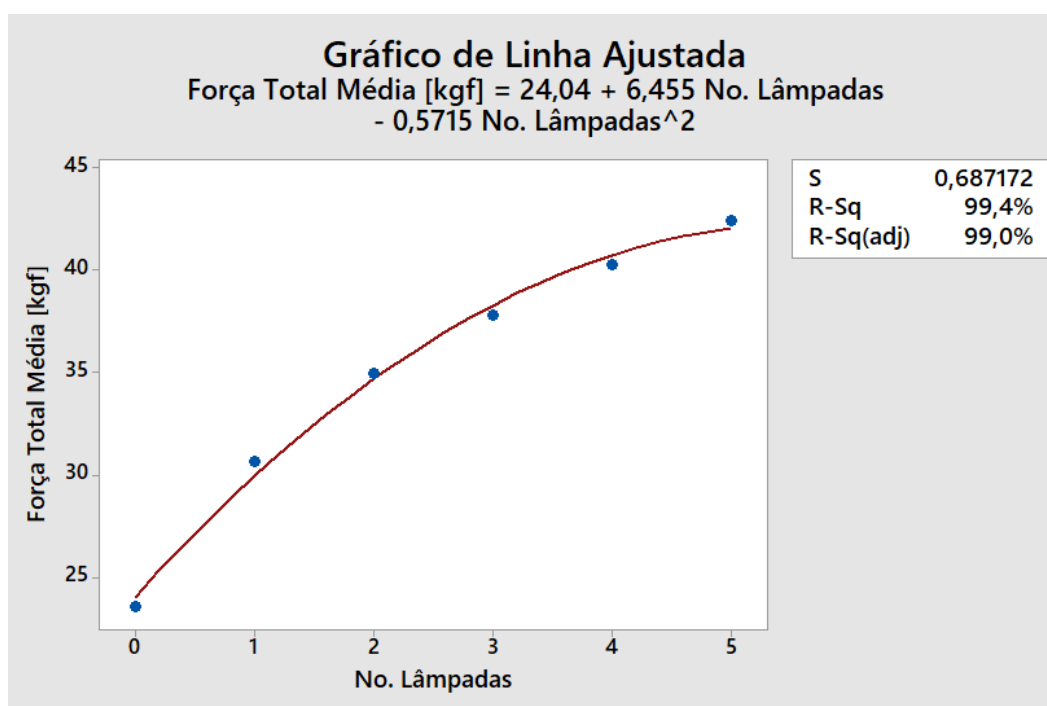


Figura 42 - Gráfico de Linha Ajustada

Portanto, a Força Total em função do número de lâmpadas pode ser representada pela seguinte equação:

$$F_{Total} = 24,04 + 6,455 \cdot N_{lâmpas} - 0,5715 \cdot (N_{lâmpas})^2 \quad (39)$$

Nesta regressão, os parâmetros de validação de dados foram mais favoráveis para a equação de 2º grau, sendo que pelas simulações (no Minitab) das regressões para as equações de 1º e de 3º graus apresentaram resultados menos favoráveis.

#### 4.1.3. Pós Regressão

São apresentados os gráficos que foram elaborados a partir das equações obtidas no processo de regressão linear.

As Figuras 43 e 44 demonstram que a potência no pedivela e a potência coletada são crescentes em função da rotação e também são crescentes em função do aumento de lâmpadas.

Proporcionalmente a  $P_{col12}$  e  $P_{col13}$  apresentaram melhor relação entre a rotação e a potência coletada, acredita-se que este fato esteja ligado ao movimento mais uniforme da pedala, pois com menor potência de acionamento do pedivela (no caso  $P_{col12}$  e  $P_{col13}$ ) fica mais confortável a pedalada. Devido ao maior esforço necessário para acionar o pedivela com 4 e 5 lâmpadas (no caso  $P_{pediv14}$  e  $P_{pediv15}$ ) a pedalada acaba ficando mais “quadrada”, o que pode comprometer o seu rendimento. Em estudos futuros, poderá ser avaliada a influência de um volante de inércia inserido no sistema, com a finalidade de ser melhorar a qualidade de pedalada e conseqüentemente o seu rendimento.

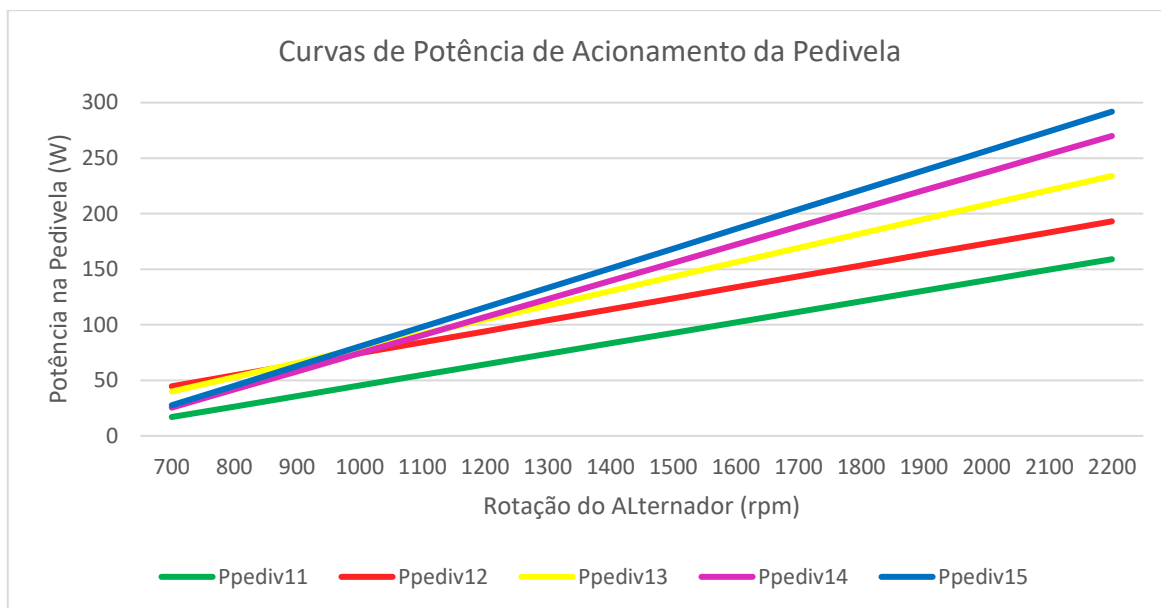


Figura 43 - Curvas de Potência do Pedivela

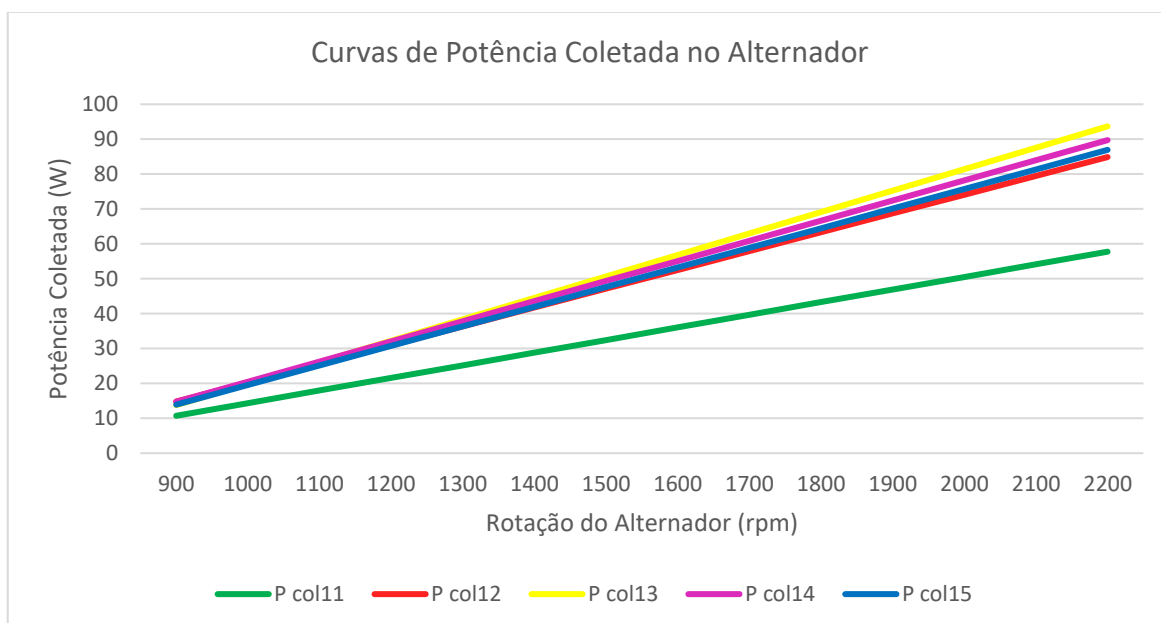


Figura 44 - Curvas de Potência Coletada

A partir da relação entre os dados de  $P_{pediv}$  e  $P_{col}$  pode-se obter as curvas de rendimento do SCE em função da rotação do alternador e do número de lâmpadas acesas durante os testes conforme apresentado na Figura 45.

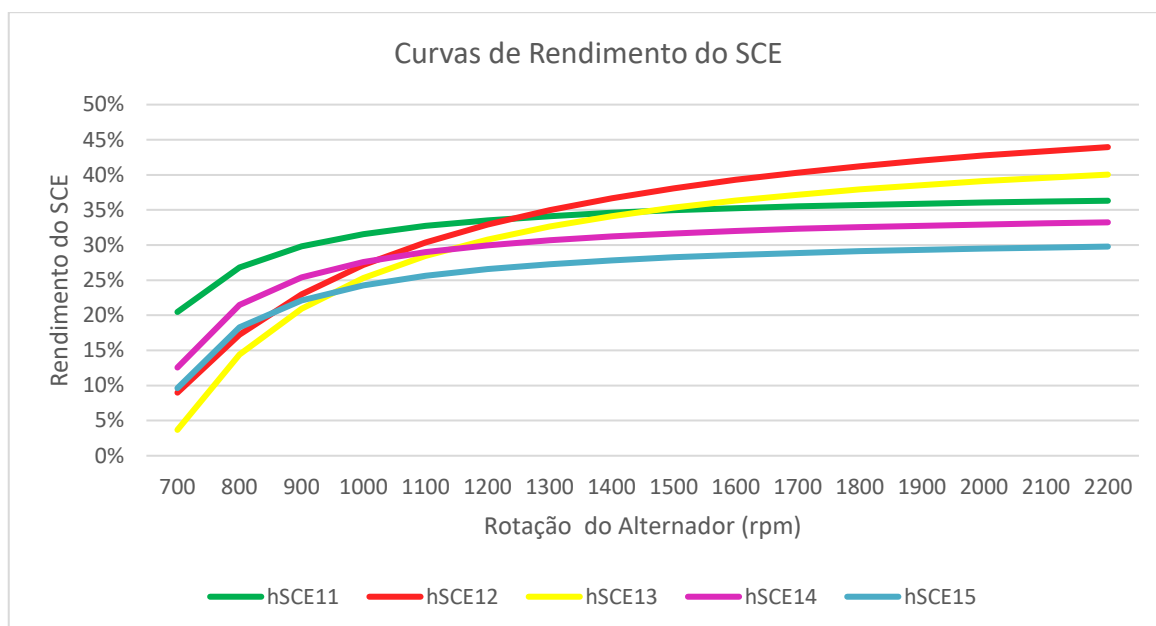


Figura 45 - Rendimento do SCE

Pode-se destacar que as melhores condições de rendimento são verificadas quando estão 2 ou 3 lâmpadas acesas e com rotações mais altas (a partir de 1.400 rpm). As condições de extremidade da variável esforço (1 lâmpada ou 4 e 5 lâmpadas) resultam em menores valores de rendimento.

#### 4.1.4. Rendimento Global ( $\eta_{global}$ )

A Tabela 22 apresenta o rendimento global por nível de treino ( $\eta_{global}$ ), a partir do fornecimento de trabalho máximo disponível para o corpo  $B_{MT}$  (Wh) e do rendimento do sistema de colheita de energia ( $\eta_{SCE}$ ).

Tabela 22 - Rendimento Global por Nível de Treino (2 treinos de 30 min)

$NIV_{treino}$	$B_{MT}$ (Wh)	$\eta_{corp}$ (%)	$E_{pediv}$ (Wh)	$\eta_{SCET}$ (%)	$E_{col}$ (Wh)	$\eta_{globalt}$ (%)
1-Base	540,8	30,0	162,2	40,8	66,2	12,2
2-Iniciante	569,2	30,0	170,8	40,1	68,5	12,0
3-Intermediário	679,9	30,0	204,0	38,5	78,5	11,5
4-Avançado	752,2	30,0	225,7	36,0	81,2	10,8
5-Profissional	771,8	30,0	231,5	35,9	83,0	10,8
<b>Média</b>	<b>662,8</b>	<b>30,0</b>	<b>198,8</b>	<b>38,2</b>	<b>75,5</b>	<b>11,5</b>

A Figura 46 apresenta um resumo do fluxo de energia (do treino nível 1-Base) em função dos rendimentos de cada etapa do processo de colheita de energia e a obtenção do rendimento global ( $\eta_{globalt}$ ). O Apêndice 16 apresenta este processo para todos os níveis de treino.

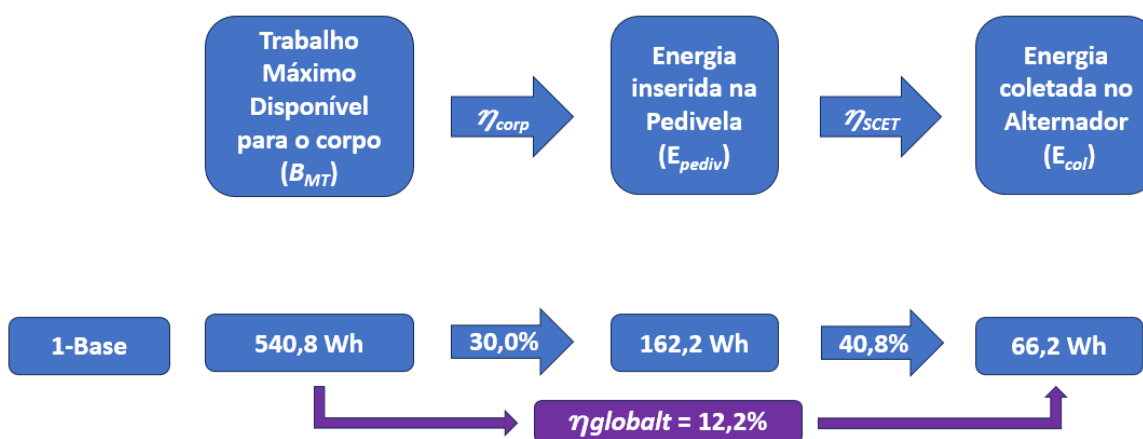


Figura 46 - Rendimento Global para o Nível de Treino 1 (Base)

Para efeito comparativo, a estimativa de uma refeição rápida contendo um sanduíche cheeseburger (200 g), uma porção de batatas fritas (120 g) e refrigerante (330 ml), possui por volta de 1.252 Wh (1.077 kcal) (TABELA DE CALORIAS NET, 2026), o que precisaria de aproximadamente 2 horas e 19 minutos de prática para ser consumida em um treino nível Base 1.

#### 4.1.5. Capacidade de Colheita de energia da FCE em 10 anos ( $FCE_{total}$ )

Para fins de cálculo de colheita de energia da FCE serão utilizados os dados referentes à média ponderada de colheita de energia, Tabela 23.

Tabela 23 - Média ponderada de colheita de energia

Intensidade do Treino	% de Treinos Praticados	Colheita para 2 treinos de 30 min (Wh)	Parcela de Contribuição (Wh)
1-Base	4,0%	66,2	2,65
2-Iniciante	15,0%	68,5	10,27
3-Intermediário	38,0%	78,5	29,82
4-Avançado	28,0%	81,2	22,72
5-Profissional	15,0%	83,0	12,45
<b>Média Ponderada</b>			<b>77,91</b>

A Tabela 24 apresenta os parâmetros e a sequência de cálculo utilizados para a obtenção de  $FCE_{total}$ .

Tabela 24 - Determinação da Capacidade de Colheita de Energia de uma FCE em 10 anos

Item	Valor
$FCE_{tprod}$ (h)	9
Dias de funcionamento da FCE por semana	7
$FCE_{mp}$ (Wh)	77,91
$N_{ciclistas}$ (un.)	32
$FCE_{semanal}$ (kWh)	157,1
$FCE_{anual}$ (kWh)	8.167,9
$FCE_{total}$ (kWh)	81.697,1

Portanto, uma FCE será capaz de coletar um total de 81.697,1 kWh em 10 anos de funcionamento. Este será o valor utilizado para realizar o cálculo da taxa de emissão da FCE ( $TE_{FCE}$ ).

## 4.2. Análise Ambiental

### 4.2.1. Potencial de mitigação de mudanças climáticas associado ao SCE

A Tabela 25 apresenta as emissões de GEE associadas aos componentes e materiais da FCE. As bicicletas representam a maior parcela das emissões, seguidas por materiais adicionais como alumínio, aço, silício, o conversor de energia e cabos elétricos. Esses materiais passam, notavelmente, por processos térmicos que são intensivos em uso de energia e apresentam altas emissões associadas.

Tabela 25 - Emissões associadas aos componentes e materiais da FCE

<b>Item</b>	<b>Emissões (kg CO<sub>2</sub>-eq)</b>
Bicicletas	4.849,61
Cabos elétricos	443,70
Conversor	336,96
Aço	511,44
Alumínio	683,93
Cromo	21,87
Borracha	5,85
Cobre	106,09
Estanho	1,01
Fibra de vidro	0,48
Graxa	0,73
Latão	12,14
Polímero	37,41
Resina epóxi	1,23
Silício	364,04
Zinco	1,35
<b>Total</b>	<b>7.377,84</b>

Portanto, o total de emissões geradas em 10 anos será  $EG_{FCE} = 7.377,82$  kg CO<sub>2</sub>-eq. O Apêndice 17 apresenta uma tabela com os fatores de emissões de GEE de cada material por kg.

A Figura 47 demonstra a participação dos principais componentes e materiais nas emissões de GEE, com destaque de 65,7% de participação para as bicicletas.

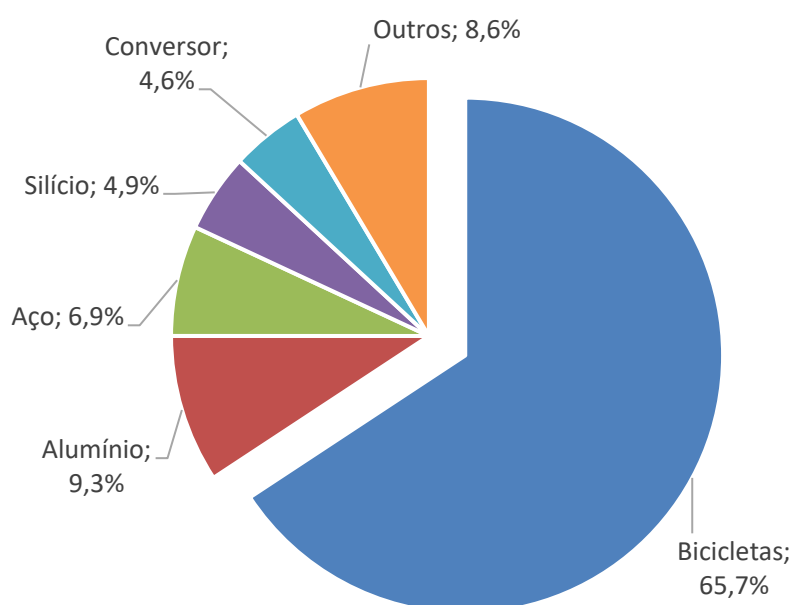


Figura 47 - Participação dos principais componentes e materiais nas emissões de GEE

A taxa de emissão da FCE ( $TE_{FCE}$ ) será calculada conforme segue:

$$TE_{FCE} = \frac{EG_{FCE}}{FCE_{total}} = \frac{7.377,84}{81.697,1} = 0,090$$

Portanto, a taxa de emissão da FCE é  $TE_{FCE} = 0,090$  kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh. Esse valor é inferior à taxa de emissão da matriz elétrica brasileira ( $TE_{mix} = 0,152$  kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh obtido do SimaPro a partir do mix elétrico), esta comparação demonstra o potencial da utilização das FCEs para mitigação de mudanças climáticas. O fator de emissões evitadas pela FCE ( $FEE_{FCE}$ ) é de 0,062 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh (= 0,152 - 0,090), este fator será inserido no aplicativo GHP e fará parte do cálculo de emissões evitadas com a prática da atividade.

É importante atentar para o fato de que o fator do  $TE_{mix}$  varia ano a ano e sofre grande influência da incidência de chuvas nas regiões dos reservatórios das hidrelétricas e também do crescimento da participação das energias renováveis na matriz de geração elétrica brasileira. O Apêndice 18 apresenta a variação do  $TE_{mix}$  ao longo dos anos.

A energia elétrica consumida a partir da FCE, em consumidores próximos a sua instalação, evita o consumo de eletricidade da rede centralizada. A energia fornecida pela rede centralizada possui maior intensidade de emissão carbono na sua produção e necessita de maiores distâncias de deslocamento conseguir atender o consumidor final.

A Tabela 26 apresenta o cálculo das emissões evitadas pela FCE em 10 anos ( $EE_{FCE}$ ), em comparação à produção realizada pelo *mix* elétrico brasileiro.

Tabela 26 - Emissões de GEE evitadas pela FCE em 10 anos

<b>Geração</b>	<b>Produção de Energia em 10 anos (kWh)</b>	<b>Fator de Emissões (kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh)</b>	<b>Emissões em 10 anos (kg CO<sub>2</sub>-eq)</b>
Mix Brasil	81.679,1	0,152	12.415,2
FCE	81.679,1	0,090	7.377,8
<b>Emissões Evitadas pela FCE (kg CO<sub>2</sub>-eq)</b>			<b>5.037,4</b>

Vale ressaltar que este valor é apenas para uma Fazenda de Colheita de Energia e que quanto maior for a amplitude de utilização deste sistema, maior será a capacidade de se evitar emissões de GEE.

O Brasil possui uma matriz elétrica com uma parcela significativa de fontes renováveis, porém países com produção de eletricidade mais dependente de combustíveis fósseis apresentaram valores de taxa de emissão mais elevados em 2024, como por exemplo a Índia (0,730 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh), a China (0,565 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh) e os Estados Unidos (0,320 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh) (IEA, 2025). Quanto maior for a taxa de emissão do país, mais vantajosa fica a utilização das FCEs.

#### 4.2.2. Emissões Geradas pela Variação de Dietas

A partir dos percentuais de fonte de proteínas e de taxa de ingestão diária em função da massa corporal (Figura 36), podemos calcular a quantidade de proteína provinda de cada fonte, a Tabela 27 demonstra esta distribuição em função da massa corporal do indivíduo.

A Tabela 28 apresenta os valores das Emissões Geradas pela Dieta Padrão ( $EG_{pdrdieta}$ ) para um praticante de 80 kg.

Os valores da coluna “Emissões por kg de proteína” das Tabelas 28 e 29 foram obtidos a partir do SimaPro v.9.6.0.1 e de Clune, Crossin e Verghese (2017), o Apêndice 19 apresenta os cálculos deste parâmetro de forma detalhada.

Tabela 27 - Consumo médio diário de diferentes fontes de proteínas em função da massa corporal

Massa corporal (kg)	Taxa de ingestão de proteínas (g/kg/dia)	Proteína necessária por dia (g)	Quantidade consumida de proteína/dia (g)				
			Aves (35,7%)	Carne bovina (32,3%)	Feijão (24,0%)	Peixes marinhos (6,5%)	Queijos frescos (1,5%)
50	1,3	65	23,2	21,0	15,6	4,2	1,0
60	1,3	78	27,8	25,2	18,7	5,1	1,2
70	1,3	91	32,5	29,4	21,8	5,9	1,4
80	1,3	104	37,1	33,6	25,0	6,8	1,6
90	1,3	117	41,8	37,8	28,1	7,6	1,8
100	1,3	130	46,4	42,0	31,2	8,5	2,0
110	1,3	143	51,1	46,2	34,3	9,3	2,1
120	1,3	156	55,7	50,4	37,4	10,1	2,3

Tabela 28 - Emissões totais de GEE a partir do consumo diário de proteína

<b>Massa corporal do praticante - 80 kg</b>			
<b>Fonte de proteína</b>	<b>Proteína consumida/dia (kg)</b>	<b>Emissões por kg de proteína (kg CO<sub>2</sub>-eq/kg)</b>	<b>Emissões Geradas pela Dieta Padrão (<math>EG_{padrdiet}</math>) (kg CO<sub>2</sub>-eq)</b>
Aves (35,7%)	0,0371	6,73	0,250
Carne bovina (32,3%)	0,0336	134,91	4,532
Feijão (24,0%)	0,0250	8,86	0,221
Peixes marinhos (6,5%)	0,0068	11,82	0,080
Queijos frescos (1,5%)	0,0016	124,00	0,193
<b>Total</b>			<b>5,276</b>

Portanto, o valor padrão que será utilizado como referência para comparativos de consumos diários de proteínas será  $EG_{padrdiet} = 5,276$  kg CO<sub>2</sub>-eq (para massa corporal de 80 kg). A Figura 48 mostra que a carne bovina é a principal fonte de emissão de GEE com 85,9% do total.

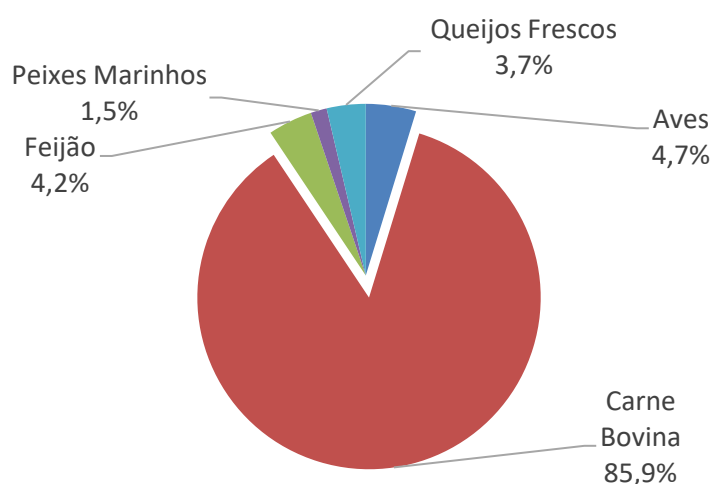


Figura 48 - Participação das fontes de proteína nas emissões de GEE

A Tabela 29 apresenta as variações possíveis para que, a quantidade de proteínas fornecida pela carne bovina (0,0336 g), seja substituída por outras fontes de proteínas e as respectivas emissões resultantes desta troca.

Tabela 29 - Análise de fontes substitutas para a carne bovina

Fonte de proteína	Proteína consumida/dia (kg)	Emissões por kg de proteína (kg CO <sub>2</sub> -eq/kg)	Emissões totais por dia (kg CO <sub>2</sub> -eq)
Carne bovina	0,0336	134,91	4,5319
Aves	0,0336	6,73	0,2260
Feijão	0,0336	8,86	0,2975
Whey Protein	0,0336	18,13	0,6089
Ovo	0,0336	32,40	1,0882
Tofu	0,0336	12,31	0,4136
Proteína Isolada de Soja	0,0336	5,71	0,1917
Concentrado de soja	0,0336	12,46	0,4186

Adotando-se que as emissões de 4,5319 kg CO<sub>2</sub>-eq da carne bovina seja 100%, pode-se verificar na Figura 49, qual seria o percentual de emissões de cada fonte em comparação a da carne bovina.

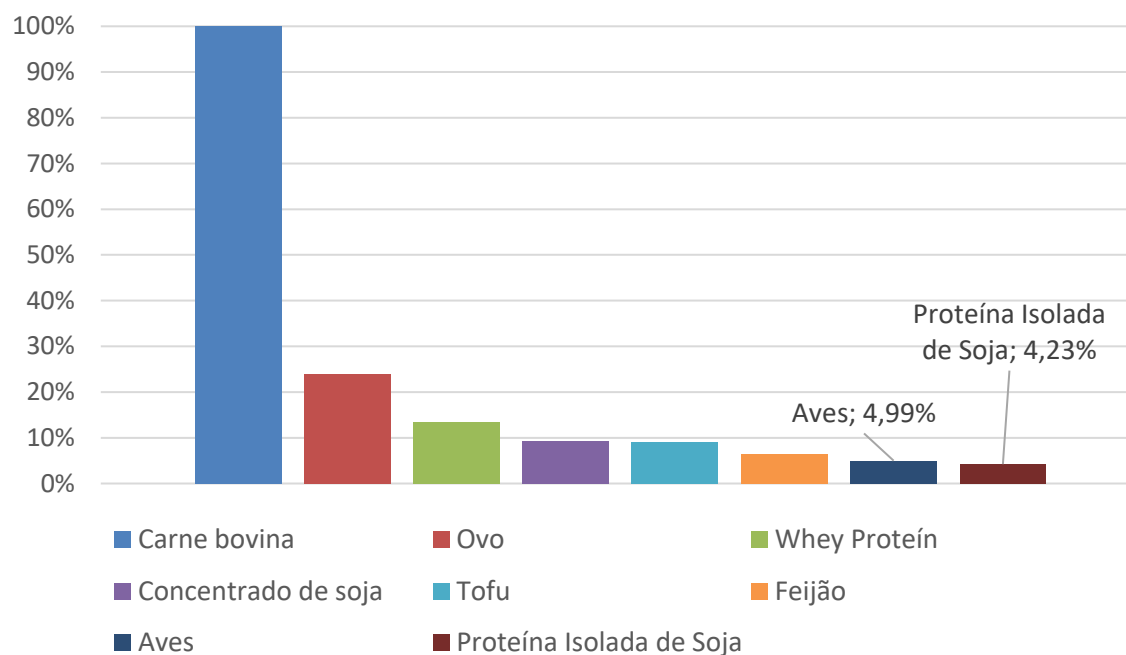


Figura 49 - Percentual de emissões em relação a carne bovina

As proteínas provenientes das aves e da proteína isolada de soja são as que apresentam as menores quantidades de emissões. Levando-se em consideração que o consumo de aves é mais popular e mais acessível que o de proteína isolada de soja, será realizada uma análise da variação da dieta com a substituição da carne bovina pela de ave. A Tabela 30 mostra os valores das Emissões Geradas pela Variação de Dietas ( $EG_{vardiet}$ ).

Tabela 30 - Emissões totais de GEE com a substituição da carne bovina pela de ave

Massa corporal do praticante - 80 kg			
Fonte de proteína	Proteína consumida/dia (kg)	Emissões por kg de proteína (kg CO <sub>2</sub> -eq/kg)	Emissões Geradas pela Dieta Padrão ( $EG_{padrdiet}$ ) (kg CO <sub>2</sub> -eq)
Aves	0,0371	6,73	0,250
Aves	0,0336	6,73	0,226
Feijão	0,0250	8,86	0,221
Peixes marinhos	0,0068	11,82	0,080
Queijos frescos	0,0016	124,00	0,193
<b>Total</b>			<b>0,970</b>

As emissões diárias que inicialmente eram de 5,276 kg CO<sub>2</sub>-eq, reduziram para 0,970 kg CO<sub>2</sub>-eq com a substituição da carne bovina pela de ave. Esta mudança de hábito alimentar pode resultar em valores expressivos de redução de emissões de GEE ao longo do tempo, a Tabela 31 apresenta o total de emissões evitadas no valor de 15.727,5 kg CO<sub>2</sub>-eq, para um período de 10 anos, pelo simples fato de realizar a substituição de uma fonte de proteína.

A análise de emissões provindas de alimentação é de grande importância, uma vez que 1 praticante de 80 kg pode emitir 19.271,0 kg CO<sub>2</sub>-eq em 10 anos de alimentação com uma dieta brasileira padrão, este valor comparado às emissões de uma FCE em 10 anos, que foi de 7.377,8 kg CO<sub>2</sub>-eq, acende um sinal de alerta para futuros estudos.

Tabela 31 - Emissões evitadas em 10 anos pela variação de fonte de proteína

<b>Tipos de Emissões</b>	<b>Emissões totais de GEE por dia (kg CO<sub>2</sub>-eq)</b>	<b>Emissões totais de GEE em 10 anos (kg CO<sub>2</sub>-eq)</b>
Emissões Geradas pela Dieta Padrão ( $EG_{padrdiet}$ )	5,276	19.271,0
Emissões Geradas pela Variação de Dietas ( $EG_{vardiet}$ )	0,970	3.543,5
	<b>Total de emissões evitadas</b>	<b>15.727,5</b>

Não é objetivo deste trabalho condenar o consumo de carne bovina, os resultados apenas alertam para a importância da necessidade de se incentivar a redução de emissões de GEE provenientes de seu consumo, desenvolvendo-se melhorias em seus processos de produção, tais como estratégias de mitigação do metano emitido pelo rebanho, bom manejo da pastagem, rotação de lavouras e aumento do estoque de carbono no solo (FILOGÔNIO, 2024).

### 4.3. Potencial de redução de custos com Saúde Pública

Um fator de grande importância que deve ser levado em consideração é a quantidade total de pessoas que as diversas FCEs, espalhadas pelo país, possa atender. Para tanto, será necessário verificar qual o investimento necessário para implementação desse serviço.

As Tabelas 32 e 33 apresentam respectivamente os custos necessários para a montagem de um SCE e para montagem e instalação de uma FCE.

Uma FCE tem a capacidade de atender por volta de 800 pessoas (Equação 21), desta forma, a implementação de uma FCE resultaria de um investimento de R\$ 97,50 por pessoa atendida.

Tabela 32 - Composição de preço de um SCE

Item (SCE)	Quantidade	Preço (R\$)	Total (R\$)
Bicicleta	1	700,00	700,00
Cabos elétricos # 1,5 mm <sup>2</sup> [m]	2	1,40	2,80
Cabos elétricos # 1,0 mm <sup>2</sup> [m]	1	1,20	1,20
Cantoneira 3/4" [m]	5,3	12,00	63,60
Cubo traseiro	2	40,00	80,00
Câmbio traseiro	2	30,00	60,00
Coroa (52 dentes)	2	30,00	60,00
Catraca Simples (14 dentes)	1	20,00	20,00
Catraca 7 marchas (14-28 dentes)	1	40,00	40,00
Corrente (de bicicleta)	2	20,00	40,00
Alternador (20 A)	1	700,00	700,00
Arduino ESP 32	1	25,00	25,00
Parafusos com porca (6 mm X 16,5 mm)	7	1,00	7,00
Barra roscada de 6mm [m]	0,155	4,00	0,62
Parafusos com porca (3,5mm X 15 mm)	2	0,35	0,70
Porca (6 mm)	5	0,38	1,90
Arruela para parafuso (6 mm)	8	0,05	0,40
Lâmpada (55 W)	5	12,07	60,35
Módulo Relé 8 canais	1	70,00	70,00
Sensor de Rotação	1	11,00	11,00
Mão-de-obra de montagem (SCE)	1	250,00	250,00
<b>Valor total</b>			<b>2.194,57</b>

Segundo o IBGE (2025), a população brasileira em 2025 era de aproximadamente 213,4 milhões. Para atender 1% da população, seria necessário instalar 2.668 unidades de FCEs, resultando num investimento de R\$ 208.067.288,32.

Tabela 33 - Composição de preço de uma FCE

<b>Item (FCE)</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Preço (R\$)</b>	<b>Total (R\$)</b>
Sistema de Colheita de Energia	32	2.194,57	70.226,24
Conversor 12 Vdc/220 Vac (7.000 W)	1	1.500,00	1.500,00
Cabos elétricos # 25 mm <sup>2</sup> [m]	10	22,00	220,00
Cabos elétricos # 50 mm <sup>2</sup> [m]	65,6	50,00	3.280,00
Cabos elétricos # 70 mm <sup>2</sup> [m]	12	65,00	780,00
Cabos elétricos # 95 mm <sup>2</sup> [m]	6	80,00	480,00
Mão-de-obra de montagem (FCE)	1	1.500,00	1.500,00
<b>Valor total</b>			<b>77.986,24</b>

Parte deste investimento será recuperada a partir da própria colheita de energia realizada pela utilização das FCEs, a Tabela 34 apresenta os valores gerado em função da colheita de energia, nas localidades com a taxa de maior e de menor preço, praticado no Brasil.

Tabela 34 - Valor anual gerado em função da colheita de energia de uma FCE

<b>Localidade</b>	<b>Produção Anual (kWh)</b>	<b>Preço da Energia (R\$/kWh)</b>	<b>Valor Anual Gerado (R\$)</b>	<b>Valor anual gerado por 2.668 FCEs (R\$)</b>
Pará	8.167,91	0,97830	7.990,67	21.319.108,92
Paraíba	8.167,91	0,57492	4.695,90	12.528.653,89

No Brasil, o valor da energia elétrica pode variar bastante em função vários parâmetros (bandeiras tarifárias, impostos, região, etc.), portanto o retorno de investimento estará diretamente ligado a estes parâmetros. De qualquer forma, pode-se notar que a colheita de energia das FCEs representa um abatimento considerável no investimento inicial (de 12.528.653,89 a 21.319.108,92 por ano), lembrando que a expectativa de vida útil de uma FCE é de 10 anos de produção.

Segundo dados do Ministério da Fazenda (BRASIL, 2025), os gastos com Saúde Pública em 2024 foi da ordem de R\$ 951 bilhões, referentes à 5,03% do PIB (Produto Interno Bruto).

Masters *et al.* (2017) realizaram uma revisão sistemática que apontou que para cada £1 investida em saúde pública, £14 serão posteriormente devolvidas à economia mais ampla da saúde e assistência social. Admitindo-se este fator de 1:14 e fazendo um comparativo com o investimento de R\$ 208 milhões, necessários para implementar 2.668 unidades de FCEs, posteriormente evitaria custos da ordem de R\$ 2,91 bilhões.

Duijvestijn *et al.* (2023) apontaram que numa comparação entre grupos fisicamente ativos e inativos os custos de saúde acabam sendo mais baixos para os grupos ativos, variando de 9,0% a 26,6% a menos. Considerando-se que 2.668 FCEs atendam 1% da população brasileira e que este percentual teoricamente é contemplado por R\$ 5,91 milhões (1% dos gastos com Saúde Pública em 2024), a projeção de redução de gastos com Saúde Pública da população atendida pelas FCEs seria na faixa entre R\$ 532 milhões e R\$ 1,57 bilhões.

De Boer *et al.* (2020) calcularam a porcentagem dos custos totais de saúde pública em nível nacional que poderiam ser economizados caso uma porcentagem da população aderisse às diretrizes da OMS. Para 1% de adesão às diretrizes, o benefício foi de 0,4% dos custos totais de saúde da população. Fazendo-se uma projeção para os dados do Brasil, caso 1% da população fosse contemplada com as FCEs e passassem a praticar atividades regulares, a redução dos gastos seria de R\$ 2,36 bilhões.

Sato *et al.* (2020) relataram uma defasagem temporal entre o fator de risco e os custos de saúde. Eles concluíram que se 10% da população se tornasse ativa, após 2 anos, 0,4% do custo total com saúde poderia ser evitado e que após 3 anos este percentual subiria para 1,0%. Trazendo estes números para a realidade brasileira, seriam necessários R\$ 2,08 bilhões para implementar 26.680 FCEs e atender 10% da população, este investimento resultaria na redução de gastos com Saúde Pública no valor de R\$ 2,36 bilhões após 2 anos ou de R\$ 5,91 bilhões após 3 anos.

A Tabela 35 exibe um resumo dos dados acima avaliados.

Tabela 35 - Resumo da análise de redução de custos com Saúde Pública

Referência	Indicadores do Estudo	Adequação aos dados do Brasil com a implementação das FCEs
Masters <i>et al.</i> (2017)	Para cada £1 investida em saúde pública, £14 serão posteriormente devolvidas.	Investimento de R\$ 208 milhões - Gastos evitados R\$ 2,91 bilhões.
Duijvestijn <i>et al.</i> (2023)	Redução de custos entre 9,0% e 26,6% para grupos fisicamente ativo.	Investimento de R\$ 208 milhões - A redução de custos entre R\$ 532 milhões e R\$ 1,57 bilhões para grupos fisicamente ativos.
De Boer <i>et al.</i> (2020)	Para 1% de adesão às diretrizes da OMS, 0,4% de redução dos custos totais.	Investimento de R\$ 208 milhões - Custos evitados R\$ 2,36 bilhões.
Sato <i>et al.</i> (2020)	Caso 10% da população se torne ativa, após 2 anos, 0,4% do custo total com saúde pode ser evitado e após 3 anos este percentual sobe para 1,0%.	Investimento de R\$ 2,08 bilhões - Redução de gastos de R\$ 2,36 bilhões após 2 anos ou de R\$ 5,91 bilhões após 3 anos. (Fator de 208 mi para 591 mi, para facilitar o comparativo)

A partir da análise realizada, pode-se evidenciar que ações conjuntas como a criação do conceito de Fazendas de Colheita de Energia; o envolvimento de setor público, investindo na disseminação das FCEs pelo país e possibilitando que a população tenha mais acesso à prática de atividades físicas e; à conscientização por parte da população sobre a importância da prática de exercícios físicos regular, tem grande potencial para contribuir para a redução de custos com Saúde Pública.

O objetivo deste tópico não é apresentar um valor exato de redução de custos, mas de demonstrar benefícios financeiros que a implementação das FCEs pode trazer. A partir dos dados avaliados pode-se dizer que para um investimento de R\$ 208 milhões, a redução de custos estimada variou entre R\$ 532 milhões e R\$ 2,91 bilhões, sinalizando que o sistema tem grande potencial.

#### 4.4. Análise Comparativa com Estudos Anteriores

Sukumaran e Purushothaman (2014) concluíram que uma máquina de exercício de mergulho era capaz de gerar uma potência de 10 W, Barois, Caverly e Marshall (2010)

chegaram a potência de 150 W para máquinas elípticas. Este estudo, com ciclismo *indoor*, obteve o valor de 75,5 W de geração.

Haji, Lau e Agogino (2010) obtiveram a redução anual de 132 kg de CO<sub>2</sub>-eq para cada máquina elíptica. Barois, Caverly e Marshall (2010) concluíram que uma máquina elíptica, trabalhando 8 horas/dia reduziriam 73 kg de CO<sub>2</sub>-eq. Cada unidade geradora do GHP, analisado neste estudo, seria capaz de evitar a emissão de 16 kg de CO<sub>2</sub>-eq por ano.

É importante evidenciar que para uma análise mais criteriosa seria necessário avaliar diversos fatores que podem contribuir para a variação dos parâmetros analisados, como por exemplo o modelo das máquinas e os tipos de exercícios vão influir na potência de geração e a localidade do estudo e as suas respectivas fontes de geração da sua matriz elétrica podem influir na variação das emissões de GEE.

## CAPÍTULO V – CONCLUSÕES

### 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas de colheita de energia têm um papel muito importante nos dias de hoje e principalmente para as futuras gerações. A possibilidade de coletar uma energia que estava sendo perdida, é um argumento muito forte num cenário em que a busca por energia limpa e de menor custo é cada vez maior.

O *Greener&Healthier Power* é um sistema capaz de coletar a energia que está sendo diariamente dissipada nas aulas de *spinning* e nos incontáveis rolos de treinos e bicicletas ergométricas utilizadas por ciclistas amadores e profissionais espalhados pelo Brasil e pelo mundo. Este sistema ainda apresenta o diferencial do aplicativo GHP, que busca estimular à prática do ciclismo *indoor* de uma maneira ainda mais interativa e agradável.

Os testes realizados revelaram que, para 1 hora de treino de ciclismo, a colheita de energia pode ser de 75,5 Wh, sendo necessário que o corpo forneça uma energia de 662,8 Wh, resultando num rendimento global de 11,5%, em média.

Considerando-se que uma Fazenda de Colheita de Energia, com 32 bicicletas geradoras, funcione 9 horas/dia, 7 dias/semana, sua capacidade de colheita de energia anual será de 8.167,9 kWh.

A emissões associadas aos componentes e materiais de uma Fazenda de Colheita de Energia teve um total de 7.377,84 kg CO<sub>2</sub>-eq, sendo a bicicleta o componente com a maior contribuição percentual (65,7%). A taxa de emissões da FCE foi de 0,090 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh, valor inferior ao da taxa de emissão da matriz elétrica brasileira que é de 0,152 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh. Portanto, com a implementação de cada FCE no Brasil, seria possível evitar as emissões de 5.037,4 kg CO<sub>2</sub>-eq em 10 anos. Ressaltando que Brasil possui uma matriz elétrica com uma parcela significativa de fontes renováveis, em países com maior taxa de emissões, como por exemplo a Índia (0,730 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh), a China (0,565 kg CO<sub>2</sub>-

eq/kWh) e os Estados Unidos (0,320 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh), a implementação do sistema se torna ainda mais vantajosa.

Apesar de a colheita de energia obtida a partir das práticas de atividades físicas ser considerada uma energia verde, a análise da dieta revelou que é importante atentar para a variação das fontes de proteínas. A carne bovina apresentou uma participação de 85,9% das emissões de gases de efeito estufa, referentes às fontes de proteína no consumo diário per capita do brasileiro. Para uma pessoa de 80 kg, a simples substituição da quantidade de proteína proveniente da carne bovina pela proteína proveniente de aves, seria responsável por evitar as emissões de 1.572,8 kg CO<sub>2</sub>-eq/ano, o que representaria uma contribuição ainda maior para a redução do aquecimento global.

O custo de instalação de uma Fazenda de Colheita de Energia é de R\$ 77.986,24 e pode atender por volta de 800 pessoas, resultando num investimento de R\$ 97,50 por pessoa atendida. Em um ano, a colheita de energia de uma FCE pode atingir o valor de R\$ 7.990,67 (se instalada no Pará) e o valor de R\$ 4.695,90 (se instalada na Paraíba), respectivamente o estado de maior e o de menor tarifa de energia elétrica do Brasil.

Para atender 1% da população brasileira, seria necessário instalar 2.668 unidades de FCEs, resultando num investimento de R\$ 208.067.288,32. A redução de custos com Saúde Pública decorrente da melhoria da saúde da população, a partir da prática de exercícios físicos, foi analisada. Para o investimento de R\$ 208 milhões, a redução de custos estimada variou entre R\$ 532 milhões e R\$ 2,91 bilhões, demonstrando grande potencial do sistema para redução de custos com Saúde Pública.

Portanto, um sistema interativo e conectado, capaz de realizar a colheita de energia de ciclismo *indoor*, reduzir a pegada de carbono, melhorar a qualidade de vida da população e com potencial de redução de custos com Saúde Pública.

Sugestões para futuros estudos:

- Aplicação do Protocolo de Ensaio Randomizado Controlado Cego: Avaliando o Impacto de Bicicletas Estacionárias Geradoras de Energia na Saúde Cardiovascular;
- Melhorias do sistema (Rendimento mecânico, redução da pegada de carbono dos componentes e *up grade* do sistema elétrico);
- Análise de dietas.

## REFERÊNCIAS

- ABNT, INMETRO; SBM, P. R.-M. **Guia para a expressão da incerteza de medição**. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <[https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/metrologia-cientifica/documentos-tecnicos-em-metrologia/gum\\_final.pdf/view](https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/metrologia-cientifica/documentos-tecnicos-em-metrologia/gum_final.pdf/view)>.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. Rio de JaneiroABNT, , 2014a.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14044: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações**. Rio de JaneiroABNT, , 2014b.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14071 Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Processos de análise crítica e competências do analista: Requisitos adicionais e diretrizes para a ABNT NBR ISO 14044:2009**. Rio de JaneiroABNT, , 2018.
- ADISASMITO, W. B. et al. One Health: A new definition for a sustainable and healthy future. **PLoS Pathogens**, v. 18, n. 6, p. e1010537, 1 jun. 2022.
- AGÊNCIA BRASIL. **Estiagem faz governo acionar usinas termoeletricas em Rondônia**. Disponível em: <<https://www.cartacapital.com.br/economia/estiagem-faz-governo-acionar-usinas-termoeletricas-em-rondonia/>>. Acesso em: 25 out. 2023.
- AKINAGA, H. Recent advances and future prospects in energy harvesting technologies. **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 59, n. 11, 2020.
- ALVES, E. C.; KEUTENEDJIAN MADY, C. E. Thermodynamic assessment of therapeutic hypothermia techniques for rehabilitation of post-cardiac arrest patients. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 22, n. March, p. 100752, 2020.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Nota Técnica nº 215/2022-SGT-SRG-SFF-SRD/ANEEL. 2022.

- ANNAMALAI, K.; NANDA, A. Biological aging and life span based on entropy stress via organ and mitochondrial metabolic loading. **Entropy**, v. 19, n. 10, 2017.
- ARDUINO. **Arduino UNO Q: Buy the new all-in one dev board — Arduino Official Store**. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/collections/uno/products/uno-q>>. Acesso em: 27 nov. 2025a.
- ARDUINO. **Arduino Mega 2560 Rev3 – 54 Digital I/O, 16 Analog Inputs, 256KB Flash — Arduino Official Store**. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3?queryID=undefined>>. Acesso em: 27 nov. 2025b.
- ARDUINO. **Arduino - Software**. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/software/>>. Acesso em: 27 nov. 2025c.
- BAROIS, R.; CAVERLY, M.; MARSHALL, K. UBC Social Ecological Economic Development Studies (SEEDS) Student Report An Investigation Into Using Electricity Harvesting Elliptical Machines As A Renewable Energy Source. 2010.
- BEEBY, S. P.; CAO, Z.; ALMUSSALLAM, A. Kinetic, thermoelectric and solar energy harvesting technologies for smart textiles. In: KIRSTEIN, T. B. T.-M. K.-H. FOR S.-T. D. (Ed.). **Woodhead Publishing Series in Textiles**. [s.l.] Woodhead Publishing, 2013. p. 306–328.
- BEKKER, J. Hydro and Wave Generation Integration Planning for an Isolated Diesel System in Hot Springs Cove , Canada by Supervisory Committee Hydro and Wave Generation Integration Planning for an Isolated Diesel System in Hot Springs Cove , Canada. 2021.
- BLECHMAN, A. et al. A Study of the Benefits of Retrofitting Cardiovascular Exercise Equipment of a Gym With Human Energy Harvesting Technology. **Angewandte Chemie International Edition**, 6(11), 951–952., 2009.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Portaria nº 50, de 22 de fevereiro de 2022.**, p. 1, 2022.
- BRASIL. **Brasil ampliou gastos em saúde, habitação e educação em 2024, aponta relatório Cofog — Ministério da Fazenda**. Disponível em: <<https://www.gov.br/fazenda/pt-br/assuntos/noticias/2025/dezembro/brasil-ampliou-gastos-em-saude-habitacao-e-educacao-em-2024-aponta-o-relatorio-cofog>>. Acesso

em: 19 jan. 2026.

- CARBAJALES, M.; BENJAMIN, D. Human-Powered Electricity Generation as a Renewable Resource. **BioPhysical Economics and Resource Quality**, v. 3, n. 1, p. 1–10, 2018.
- CARVALHO, M.; DELGADO, D. Potential of photovoltaic solar energy to reduce the carbon footprint of the Brazilian electricity matrix. **LALCA - Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, v. 1, n. 1, p. 64–85, 2017.
- CHAVARRIAS, M. et al. Health Benefits of Indoor Cycling : A Systematic Review. p. 1–14, 2019.
- CHETTO, M.; QUEUDET, A. Harnessing Ambient Energy for Embedded Systems. In: [s.l.: s.n.]. p. 57–83.
- CHOI, J. K.; FRILEY, P.; ALFSTAD, T. Implications of energy policy on a product systems dynamic life-cycle environmental impact: Survey and model. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 7, p. 4744–4752, 2012.
- CICHELLA, A. Human Power Production and Energy Harvesting. **Encyclopedia**, v. 3, n. 2, p. 698–704, 2023.
- CLUNE, S.; CROSSIN, E.; VERGHESE, K. Systematic review of greenhouse gas emissions for different fresh food categories. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 766–783, 2017.
- DALLMEYER, S.; WICKER, P.; BREUER, C. The relationship between sport-related government spending and sport and exercise participation: the role of funding size, period, and consistency. **International Journal of Health Promotion and Education**, v. 56, n. 4–5, p. 237–247, 2018.
- DE BOER, W. I. J. et al. How are lifestyle factors associated with socioeconomic differences in health care costs? Evidence from full population data in the Netherlands. **Preventive Medicine**, v. 130, n. July 2019, p. 105929, 2020.
- DE LIMA, K. M. et al. Solar Energy and Biomass within Distributed Generation for a Northeast Brazil Hotel. **Energies**, v. 15, n. 23, p. 1–14, 2022.
- DUIJVESTIJN, M. et al. Impact of physical activity on healthcare costs: a systematic review. **BMC Health Services Research**, v. 23, n. 1, 2023.
- DUTTA, A.; CHATTOPADHYAY, H. A brief on biological thermodynamics for human

- physiology. **Journal of Biomechanical Engineering**, v. 143, n. 7, p. 1–12, 2021.
- ECOINVENT. **Ecoinvent Database**. Disponível em: <<https://ecoinvent.org/>>. Acesso em: 28 nov. 2022.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados - Ciclo 2022. **Workshop com os Agentes de Distribuição**, 2022.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balço Energético Nacional (2025): Ano Base 2024**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-771/Relatório\\_Final\\_BEN\\_2025.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-771/Relatório_Final_BEN_2025.pdf)>.
- ENERGISA PARAÍBA. **Quadro de Tarifas EPB 2025**. Disponível em: <[https://www.energisa.com.br/sites/energisa/files/media/documents/2025-08/Quadro de Tarifas EPB 2025.pdf](https://www.energisa.com.br/sites/energisa/files/media/documents/2025-08/Quadro%20de%20Tarifas%20EPB%202025.pdf)>. Acesso em: 7 jan. 2026.
- EQUATORIAL ENERGIA - PA. **Tabela de Tarifas e Serviços Cobráveis**. Disponível em: <<https://pa.equatorialenergia.com.br/wp-content/uploads/2025/12/Tabela-de-Tarifas-e-Servicos-Cobaveis-EQTL-PA.pdf>>. Acesso em: 7 jan. 2026.
- ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32-S3-WROOM-1 & ESP32-S3-WROOM-1U Datasheet**. Disponível em: <<https://www.espressif.com/>>. Acesso em: 27 nov. 2025.
- FAHMY, M. F.; YILDIZ, F. Self Powered Fitness Equipment. v. 10, 2009.
- FILOGÔNIO, L. M. **Hábitos de consumo doméstico e os impactos ambientais: investigação por meio de uma análise ambientalmente estendida da Matriz Insumo Produto**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2024.
- FONSECA, L. F. S.; CARVALHO, M. Greenhouse gas and energy payback times for a wind turbine installed in the Brazilian Northeast. **Frontiers in Sustainability**, v. 3, 2022.
- GUTHOLD, R. et al. Worldwide trends in insufficient physical activity from 2001 to 2016: a pooled analysis of 358 population-based surveys with 1·9 million participants. **The Lancet Global Health**, v. 6, n. 10, p. e1077–e1086, 2018.
- HAJI, M.; LAU, K.; AGOGINO, A. Harnessing Human Power for Alternative Energy in Fitness Facilities: A Case Study. **Annual Conference of the Association for Sustainability in Higher Education. October**, p. 10–12, 2010.
- HASKELL, W. L.; BLAIR, S. N.; HILL, J. O. Physical activity: Health outcomes and importance for public health policy. **Preventive Medicine**, v. 49, n. 4, p. 280–282,

2009.

- HAUSCHILD, M. Z. et al. Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 3, p. 683–697, 2013.
- HOSSAIN, N. et al. Power distribution scheme using smart meter, perspective Bangladesh. **2nd International Conference on Electrical Information and Communication Technologies, EICT 2015**, n. November 2018, p. 486–491, 2016.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Consumo alimentar pessoal no Brasil. p. 2017–2018, 2017.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **População estimada do país chega a 213,4 milhões de habitantes em 2025 | Agência de Notícias**. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/44305-populacao-estimada-do-pais-chega-a-213-4-milhoes-de-habitantes-em-2025>>. Acesso em: 14 jan. 2026.
- IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Electricity 2025**. Paris, França: 2025: [s.n.]. Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/7c671ef6-2947-4e87-beea-af0e1288e1d7/Electricity2025.pdf>>.
- HEMA - INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. **Amazônia Legal: quem está sem energia elétrica**. Disponível em: <<https://energiaeambiente.org.br/produto/amazonia-legal-quem-esta-sem-energia-eletrica>>. Acesso em: 12 set. 2023.
- IGARASHI, T. L. et al. Behavior of skin temperature during incremental cycling and running indoor exercises. **Heliyon**, v. 8, n. 10, 2022.
- IHSAN, M.; VISWANATHAN, V. **Self-Powering Gyms: A Case Study on Energy Harvesting From a Static Bicycle**. , 11 nov. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/IMECE2019-11972>>
- IPCC. **IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change**. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 26 ago. 2025.
- JANSEN, A.; STEVELS, A. Combining eco-design and user benefits from human-powered energy systems, a win-win situation. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, n. 15–16, p. 1299–1306, 2006.

- JEUKENDRUP, A. E.; CRAIG, N. P.; HAWLEY, J. A. The bioenergetics of world class cycling. **Journal of Science and Medicine in Sport**, v. 3, n. 4, p. 414–433, 2000.
- KHODAYAR, M. E. Rural electrification and expansion planning of off-grid microgrids. **Electricity Journal**, v. 30, n. 4, p. 68–74, 2017.
- LAWSON, A.; PEREIRA, G. **Termelétricas e Seu Papel na Matriz Energética Brasileira**. FGV Energia: [s.n.].
- LEE, I. M. et al. Effect of physical inactivity on major non-communicable diseases worldwide: An analysis of burden of disease and life expectancy. **The Lancet**, v. 380, n. 9838, p. 219–229, 2012.
- MADY, C. E. K. et al. Exergy performance of human body under physical activities. **Energy**, v. 62, p. 370–378, 2013.
- MADY, C. E. K. et al. Exergy efficiency on incremental stationary bicycle test: A new indicator of exercise performance? **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 41, n. 12, p. 1–11, 2019.
- MADY, C. E. K.; OLIVEIRA, S. Human body exergy metabolism. **International Journal of Thermodynamics**, v. 16, n. 2, p. 73–80, 2013.
- MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. **MIT App Inventor**. Disponível em: <<https://appinventor.mit.edu/>>. Acesso em: 27 nov. 2025.
- MASTERS, R. et al. Return on investment of public health interventions: A systematic review. **Journal of Epidemiology and Community Health**, v. 71, n. 8, p. 827–834, 2017.
- MIT CLIMATE PORTAL. **Does the carbon dioxide that humans breathe out contribute to climate change? | MIT Climate Portal**. Disponível em: <<https://climate.mit.edu/ask-mit/does-carbon-dioxide-humans-breathe-out-contribute-climate-change>>. Acesso em: 5 mar. 2026.
- MOLLIET, D. S.; MADY, C. E. K. Exergy analysis of the human body to assess thermal comfort conditions: Comparison of the thermal responses of males and females. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 25, n. November 2020, 2021.
- MOREIRA, M. M. et al. Impacto da inatividade física nos custos de internações hospitalares para doenças crônicas no sistema único de saúde. **Arquivos de Ciências do Esporte**, v. 5, n. 1, p. 16–19, 2017.

- MUSTAFI, N. N. et al. Feasibility test on green energy harvesting from physical exercise devices. **AIP Conference Proceedings**, v. 1851, 2017.
- OLIVEIRA, G. P.; DELGADO, D. B. M.; CARVALHO, M. Analysis and forecast of emissions associated with electricity consumption in hospitals: Encouraging a net zero healthcare roadmap in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 324, n. April, p. 114785, 2024.
- ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **The Sustainable Development Goals Report**. , 2023. Disponível em: <<https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023.pdf>>
- OZILGEN, M. Review on Biothermodynamic Applications: Timeline, Challenges and Opportunities. **International Journal of Energy Research**, v. 41, 3 mar. 2017.
- PAN, H. et al. Kinetic energy harvesting technologies for applications in land transportation: A comprehensive review. **Applied Energy**, v. 286, n. January, p. 116518, 2021.
- PEDERNEIRAS MORAES ROCHA, J. et al. Provision of ancillary services in a grid-connected photovoltaic distributed energy resource. **IET Generation, Transmission and Distribution**, v. 16, n. 2, p. 257–266, 2022.
- PHAM, H. et al. Getting Fit in a Sustainable Way: Design and Optimization of a Low-Cost Regenerative Exercise Bicycle. **Designs**, v. 6, n. 3, p. 1–21, 2022.
- PIMENTEL, D. D. O.; CARVALHO ROSAS, P. A. Dimensionamento de um Sistema para Fornecimento de Energia para uma Comunidade Isolada. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 5, n. 3, p. 17–27, 2020.
- RENÓ, M. L. G. et al. Análise ambiental e econômica para instalação de uma planta de biodigestão em uma comunidade isolada do Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 26, n. 5, p. 813–817, 2021.
- RIBEIRO, T. J. DA S.; MADY, C. E. K. Comparison among exergy analysis methods applied to a human body thermal model. **Energy**, v. 239, p. 122446, 2022.
- SATO, M. et al. Older Adults' Physical Activity and Healthcare Costs, 2003–2014. **American Journal of Preventive Medicine**, v. 58, n. 5, p. e141–e148, 2020.
- SCHULTZ, H. S.; MADY, C. E. K.; CARVALHO, M. Concept development of exercise-to-power: The Green&Healthy power concept. **Cleaner Energy Systems**, v. 8, n. April, p. 100120, 2024.

- SIDDIQUI, O.; DINCER, I. Comparative assessment of the environmental impacts of nuclear, wind and hydro-electric power plants in Ontario: A life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 848–860, 2017.
- SIMAPRO. **SimaPro Software - Pré Sustainability**. Disponível em: <<https://pre-sustainability.com/solutions/tools/simapro-craft/>>. Acesso em: 26 ago. 2025.
- SIQUEIRA, A. DE S. E.; DE SIQUEIRA-FILHO, A. G.; LAND, M. G. P. Análise do impacto econômico das doenças cardiovasculares nos últimos cinco anos no Brasil. **Arquivos Brasileiros de Cardiologia**, v. 109, n. 1, p. 39–46, 2017.
- SPANGHERO, G. M. et al. Exergy analysis of the musculoskeletal system efficiency during aerobic and anaerobic activities. **Entropy**, v. 20, n. 2, p. 1–16, 2018.
- SUKUMARAN, S. K.; PURUSHOTHAMAN, M. **An approach in energy harvesting from fitness equipment**. 2014 International Conference on Science Engineering and Management Research (ICSEMR). **Anais...**2014.
- TABELA DE CALORIAS NET. **Fast food & hambúrguer: tabela de calorias**. Disponível em: <<https://www.tabeladecalorias.net/alimento/fast-food-hamburguer>>. Acesso em: 7 mar. 2026.
- ULLAH, M. T. et al. Harvesting green energy from wastage energy of human activities using gymnasium bicycle at Chittagong city. **2015 International Conference on Green Energy and Technology, ICGET 2015**, n. March 2020, 2015.
- VEENMAN, R. S. **A Human Powered Fitness Bicycle: Generating electricity in fitness clubs**. [s.l.] TU Delft, 2009.
- WARONGKIDH, G. An exercise bikes assisted main energy source in DC distributed power system. **2017 9th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering, ICITEE 2017**, v. 2018- Janua, p. 1–5, 2017.
- WERNER, D.; LAZARO, L. L. B. The policy dimension of energy transition: The Brazilian case in promoting renewable energies (2000–2022). **Energy Policy**, v. 175, n. October 2021, 2023.
- WORLD BANK GROUP. **Report: Universal Access to Sustainable Energy Will Remain Elusive Without Addressing Inequalities**.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Global Health Risks**. 2009.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Global recommendations on physical activity for**

health. v. 4, n. 1, 2010.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Noncommunicable diseases country profiles 2018**. Geneva: [s.n.].

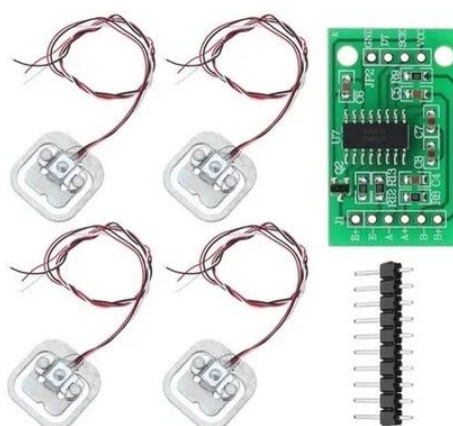
WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Physical activity**. Disponível em: <<https://www.who.int/initiatives/behealthy/physical-activity>>. Acesso em: 6 jan. 2026.

YAN, J. **Handbook of Clean Energy Systems, 6 Volume Set**. 1st. ed. [s.l.] Wiley, 2015.

ZOU, Y.; BO, L.; LI, Z. Recent progress in human body energy harvesting for smart bioelectronic system. **Fundamental Research**, v. 1, n. 3, p. 364–382, 2021.

## ANEXOS

### Anexo 1 - Conjunto de 04 Peças de Célula de Carga Sensor de Peso 50 kg e 1 Módulo HX711



#### ESPECIFICAÇÕES – CÉLULA DE CARGA

- Dimensões (mm): 34 \* 34 \* 7
- Capacidade (kg): 50
- Margem de erro (% F.S): 0,2
- Sensibilidade de saída (mv / v):  $1,1 \pm 0,15$
- Não linearidade (% F.S): 0,2
- Repetibilidade (% F.S): 0,1
- Histerese (% F.S): 0,2
- Distorção (% F.S/3min): 0,1
- Zero desvio (% F.S/1min): 0,1
- Temp. Efeito em zero (% F.S/10 ° C): 0,2
- Temp. Efeito na saída (% F.S/10 ° C): = 0,15
- Zero saída (mV / V):  $\pm 0,3$
- Resistência de entrada (O):  $1000 \pm 50$

- Resistência de Saída (O):  $1000 \pm 50$
- Resistência de Isolamento (M O): = 2000 (100VDC)
- Tensão de excitação (V): 5 ~ 10
- Temperatura de operação ( $^{\circ}$  C): -10 ~ +50
- Capacidade de sobrecarga (% F.S): 150
- Pinagem: vermelho = Sig +; branco = Exc -; azul = Exc +

#### MÓDULO HX711

- Tensão de Operação: 2,7 a 5,5 VDC
- Corrente de Operação: 1,6 mA
- Temperatura de Operação: -20 a 85 $^{\circ}$ C
- Interface: Serial Digital
- Dimensões: 29 x 17 x 4 mm

**Anexo 2 - Alternador Solarhome (12 V / 20 A / CH15587)****ESPECIFICAÇÕES – ALTERNADOR**

- Tensão de saída: 12 V DC (voltagem padrão para sistemas 12 V)
- Corrente nominal: ~20 A (corrente máxima que pode fornecer)
- Tipo: Alternador de ímãs permanentes
- Aplicações: Esse alternador é um item usado como peça de substituição genérica para várias máquinas

### Anexo 3 - Ponte Retificadora (KBPC2510 / 25A / 1000 V)



#### ESPECIFICAÇÕES – PONTE RETIFICADORA

- Modelo: KBPC2510.
- Função: Converter CA em CC (Retificação de Onda Completa).
- Corrente Máxima (IF): 25 A.
- Tensão de Pico Inversa (PIV/VRM): 1000 Volts (1000 V).
- Pinos: 4 terminais (dois para entrada AC, dois para saída DC).
- Encapsulamento: Corpo robusto com furo central para montagem em dissipador de calor.
- Aplicações: Fontes de alimentação, circuitos eletrônicos que necessitam de conversão AC/DC.

#### Anexo 4 - Capacitor Eletrolítico (10000uF / 25 V)



#### ESPECIFICAÇÕES

- Capacitância: 10.000  $\mu\text{F}$  (microfarads), indicando alta capacidade de armazenar carga elétrica.
- Tensão Nominal (WVDC): 25 V, a tensão máxima que pode ser aplicada de forma contínua sem danificar o componente.
- Polaridade: Possui polaridade (positivo e negativo), devendo ser conectado corretamente no circuito para evitar danos.
- Temperatura de Operação: Comumente especificado para 105°C, indicando boa resistência a temperaturas elevadas.
- Tipo: Eletrolítico de Alumínio, com dielétrico formado por uma camada de óxido.
- Aplicações: Usado em fontes de alimentação (SMPS), circuitos de áudio, inversores e para suavizar tensões em fontes DC.

**Anexo 5 - Capacitor Cerâmico (10 uF / 50 V)****ESPECIFICAÇÕES:**

- Tipo de Capacitor: Cerâmico Multicamadas
- Estilo de Montagem: PTH
- Cor: Amarelo
- Passo: 5,08 mm
- Capacitância: 10 uF (10 mF)
- Voltagem: 50 V
- Tolerância: 10%

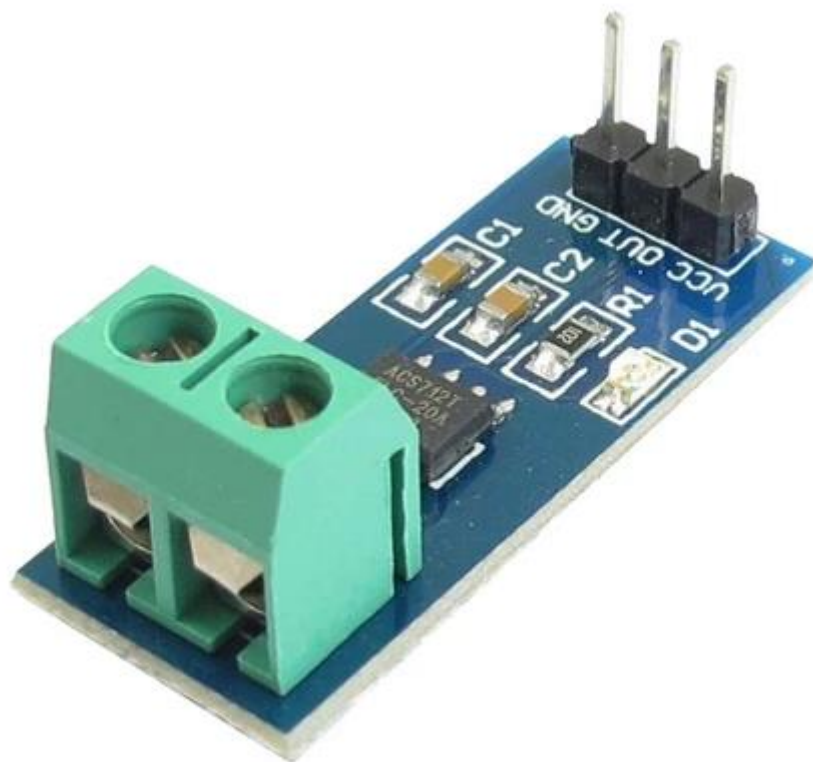
### Anexo 6 - Sensor de Tensão (0 - 25 Vdc)



#### ESPECIFICAÇÕES:

- Dimensões aprox.: 25mm×13mm
- Leitura: 0,02445 V -25 V DC
- Resolução 0,00489 V
- Margem de erro: 0,02% para 12 V

## Anexo 7 - Sensor de Corrente (20 A)



### ESPECIFICAÇÕES:

- Faixa de leitura de corrente: -20 A a +20 A
- Margem de erro: 1,5 % a 25°C
- Resistência interna: 0,0012 ohm.
- Tensão de alimentação DC: 4,5 V a 5,5 V
- Razão de saída: 100 mV/A
- Isolação: 2100 VRMS

## Anexo 8 - Microcontrolador (Arduino Uno)



### ESPECIFICAÇÕES:

- Microcontrolador: ATmega328
- Tensão de Operação: 5 V
- Tensão de Entrada: 7-9 V
- Portas Digitais: 14 (6 podem ser usadas como PWM)
- Portas Analógicas: 6
- Corrente Pinos I/O: 40 mA (pico/curta duração); 20 mA (contínua)
- Corrente Pinos 3,3 V: 50 mA
- Memória Flash: 32 KB (0,5 KB usado no bootloader)
- SRAM: 2 KB
- EEPROM: 1 KB
- Velocidade do Clock: 16 MHz

### Anexo 9 - Chave interruptora (KN-1021)



#### ESPECIFICAÇÕES:

- Modelo: KN-1021
- Tipo de Controle: Liga/Desliga (On/Off)
- Terminais: 2
- Posições: 2
- Corrente Máxima: 15 A
- Tensão Máxima: 250 V
- Dimensões:
  - Largura: 1,2 cm
  - Altura: 5,5 cm
  - Profundidade: 2,8 cm

**Anexo 10 - Lâmpada (55 W)****ESPECIFICAÇÕES:**

- Fabricante: Philips
- Modelo: 12258C1
- Tensão de trabalho: 12 Vdc
- Potência de trabalho: 55 W
- Dimensões do produto: 9,2 x 23 x 7,6 cm; 9 g

## Anexo 11 - Microcontrolador (Arduino Mega)



### ESPECIFICAÇÕES:

- Microcontrolador: ATmega2560
- Tensão de Operação: 5 V
- Tensão de Entrada: 7-12 V
- Portas Digitais: 54 (15 podem ser usadas como PWM)
- Portas Analógicas: 16
- Corrente Pinos I/O: 40 mA
- Corrente Pinos 3,3 V: 50 mA
- Memória Flash: 256 KB (8 KB usado no bootloader)
- SRAM: 8 KB
- EEPROM: 4 KB
- Velocidade do Clock: 16 MHz

## Anexo 12 - Sensor de Rotação (Infra Vermelho)



### ESPECIFICAÇÕES:

- Tipo de saída: Digital, 1 ou 0
- Nível lógico da saída quando obstáculo detectado: Nível lógico baixo
- Circuito integrado controlador: LM393
- Ângulo de detecção: 35°
- Leds: Verde - sensor ativado, vermelho
- Informação: Sensor alimentado
- Conexão: Conector macho header 2,54 mm (vcc, gnd, saída)
- Dimensões: 32 mm x 14 mm
- Distância de detecção: 2 à 30cm

### Anexo 13 - Multímetro Digital MINIPA-ET-1507B



#### ESPECIFICAÇÕES:

- Display: LCD 3 5/6 Dígitos, 6000 Contagens
- Taxa de Amostragem: Aprox. 3 vezes/segundo
- Indicação de Polaridade: Automática
- Indicação de Sobrefaixa: “OL” é mostrado
- Indicação de Bateria Fraca: O símbolo “+ ” será mostrado quando a tensão da bateria cair abaixo da tensão de operação
- Mudança de Faixa: Automática/ Manual
- Data Hold
- Backlight
- Lanterna
- Função NCV
- Modo relativo
- Auto Power Off: Aprox. 15 minutos
- Altitude de Operação: abaixo de 2000m
- Temperatura de Operação: 0°C a 40°C, (32°F a 104°F)

- Temperatura de Armazenamento: 0°C a 50°C, (32°F a 122°F)
- Umidade Relativa: = 80%
- Segurança/Conformidade: IEC/EN 61010-1, Dupla Isolação, CAT III 600V
- Grau de poluição: 2
- True RMS AC
- Alimentação: Duas Pilhas AAA 1,5V
- Dimensões: 142(A) x 70(L) x 32(P)mm
- Peso: Aprox. 205g (incluindo baterias)
- Precisão

**Tensão DC**

Faixa	Resolução	Precisão
6V	0,001V	±(0,5% +3D)
60V	0,01V	
600V	0,1V	
1000V	1V	±(0,8% +10D)

**Corrente DC**

Faixa	Resolução	Precisão
600µA	0,1µA	±(1,2% +10D)
6000µA	1µA	
60mA	0,01mA	
600mA	0,1mA	
6A	0,001A	±(2,0% +30D)
10A	0,01A	

#### Anexo 14 - Tacômetro digital a laser TDV 100 VONDER



#### ESPECIFICAÇÕES:

- Resolução da medição: 0,1 rpm (2,5-999,9 rpm) / 1 rpm (1.000-99.999 rpm)
- Precisão:  $\pm 0,1\%n+5d/rpm$  (2,5-999,9 rpm) /  $\pm 1\%n+5d/rpm$  (1.000-99.999 rpm)
- Faixa de medição com laser: 2,5-99.999 rpm
- Tipo de display: LCD de 5 dígitos
- Garantia: 3 meses
- Marca: VONDER

## Anexo 15 - Balança de precisão 10KG



### ESPECIFICAÇÕES:

- Comprimento: 24cm
- Largura: 17cm
- Altura: 4cm
- Peso: 400g
- Capacidade para até 10kg
- Com função tara
- Desligamento automático
- Função para pesar em gramas ou onça (Oz)
- Sistema de precisão de calibragem
- Uso Profissional ou Doméstico
- Design moderno para decorar
- Requer 2 Pilhas AA para funcionamento (Inclusas)

## Anexo 16 - Microcontrolador ESP32-WROOM-32 Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6



### ESPECIFICAÇÕES:

- ROM: 448 KBytes
- RAM: 520 KBytes
- Flash: 4 MB
- Clock máximo: 240MHz
- Wireless padrão 802.11 b/g/n
- Conexão Wifi 2.4Ghz (máximo de 150 Mbps)
- Antena embutida
- Conector usb c
- Wi-Fi Direct (P2P), P2P Discovery, P2P Group Owner mode e P2P Power Management
- Modos de operação: STA/AP/STA+AP
- Bluetooth BLE 4.2
- Portas GPIO: 32
- GPIO com funções de PWM, I2C, SPI, etc.
- Tensão de operação: 4,5 ~ 9V
- Taxa de transferência: 110-460800bps
- Suporta Upgrade remoto de firmware
- Conversor analógico digital (ADC)
- Dimensões: 5,5 x 2,8 x 1,3 cm (medidas totais, incluindo pinos)

**Anexo 17 - Módulo Relé 3 V / 10 A / 8 Canais com Borne KRE para ESP32****ESPECIFICAÇÕES:**

- Tensão de operação: 3 V / 3,3 V
- Número de canais: 8
- Corrente máxima: 10 A por canal
- Compatível com microcontroladores de nível lógico de 3,3 V

## APÊNDICES

### Apêndice 1 - Sketch para Arduino – Circuito 1

```

Pedalada-CargaDirEsq-Tensao-1 Corrente §
1
2 // INCLUSÃO DE BIBLIOTECAS
3 #include <HX711.h> //Sensor de Carga
4
5
6 // DEFINIÇÕES DE PINOS
7 #define pinDTR 4 //Sensor de Carga
8 #define pinSCKR 5 //Sensor de Carga
9 #define pinDTL 6 //Sensor de Carga
10 #define pinSCKL 7 //Sensor de Carga
11
12
13 // INSTANCIANDO OBJETOS
14 HX711 scaleR; //Sensor de Carga
15 HX711 scaleL; //Sensor de Carga
16
17 // DECLARAÇÃO DE VARIÁVEIS
18 float medidaR = 0; //Sensor de Carga
19 float medidaL = 0; //Sensor de Carga
20
21 int leitura; //Variável para leitura da porta analógica (Tensão_Corrente)
22
23
24 float volts; //Armazenar o cálculo (Tensão_Corrente)
25 float current; //Armazenar o cálculo (Tensão_Corrente)
26
27
28
29 void setup() {
30   Serial.begin(115200);
31
32   scaleR.begin(pinDTR, pinSCKR); // CONFIGURANDO OS PINOS DA BALANÇA //Sensor de Carga
33   scaleR.set_scale(22963); // LIMPANDO O VALOR DA ESCALA //Sensor de Carga
34
35   scaleL.begin(pinDTL, pinSCKL); // CONFIGURANDO OS PINOS DA BALANÇA //Sensor de Carga
36   scaleL.set_scale(23219); // LIMPANDO O VALOR DA ESCALA //Sensor de Carga
37
38   delay(2000); //Sensor de Carga
39   scaleR.tare(); // ZERANDO A BALANÇA PARA DESCONSIDERAR A MASSA DA ESTRUTURA //Sensor de Carga
40   scaleL.tare(); // ZERANDO A BALANÇA PARA DESCONSIDERAR A MASSA DA ESTRUTURA //Sensor de Carga
41
42
43 }
44
45 void loop() {
46
47
48   medidaR = scaleR.get_units(1); // SALVANDO NA VARIÁVEL O VALOR DA MÉDIA DE 5 MEDIDAS //Sensor de Carga
49   Serial.print("\tPD:\t"); //Sensor de Carga
50   Serial.print((medidaR-.22), 1); // ENVIANDO PARA MONITOR SERIAL A MEDIDA COM 3 CASAS DECIMAIS //Sensor de Carga
51

```

```
51
52 medidaL = scaleL.get_units(1); // SALVANDO NA VARIÁVEL O VALOR DA MÉDIA DE 5 MEDIDAS //Sensor de Carga
53 Serial.print("\tPE:\t"); //Sensor de Carga
54 Serial.print((medidaL-.22), 1); // ENVIANDO PARA MONITOR SERIAL A MEDIDA COM 3 CASAS DECIMAIS //Sensor de Carga
55
56
57
58 // put your main code here, to run repeatedly: (Tensão_Corrente) - Carga
59 int adc = analogRead(A5);
60 float voltage = adc*5/1023.0;
61 float current = (voltage-2.5)/0.100;
62
63
64 Serial.print("\tI:\t"); // (Tensão_Corrente)
65 Serial.print(-current); // (Tensão_Corrente)
66
67 leitura = analogRead(A4); // (Tensão_Corrente)
68 volts = (leitura*0.00489)*5; // Faz a primeira leitura e aguarda 10s (Tensão_Corrente)
69
70 float volts2 = ((leitura*0.00489)*5); // Faz a segunda leitura e compara, se for diferente, printa os valores
71 // comparativos. (Tensão_Corrente)
72
73 Serial.print("\tV:\t"); // (Tensão_Corrente)
74 Serial.println(volts); // (Tensão_Corrente)
75
76
77
78
79 delay(30);
80
81
82 }
```

## Apêndice 2 - Sketch para Arduino – Circuito 2

### Rotacao §

```

1
2 #include <TimerOne.h>           //biblioteca TimerOne
3
4
5 #define sensor 8               //define o pino 8 para o sinal do sensor
6
7 unsigned long voltas,perodo;
8 unsigned long rpm;
9 bool L_sensor = 0;             //variável para a leitura atual do sensor
10 bool LA_sensor = 0;           //variável para a leitura anterior do sensor
11
12
13 void setup(){
14   Timer1.initialize(10);        //obs.: 1000000 é igual a 1 segundo.
15                                 // E, 1000 é igual a 1 milissegundo
16   Timer1.attachInterrupt(Timer); //TimerOne é anexado ao "void Timer ()"
17   pinMode(sensor, INPUT);       //configura o pino do sensor como entrada
18   Serial.begin(115200);         //inicia a comunicação serial
19   Serial.println("Pronto para começar"); //imprimi o texto entre aspas
20
21 }
22 void loop(){
23   //faz a leitura do sensor e atribui esse valor para a variável L_sensor
24   L_sensor = digitalRead(sensor);
25
26   //SE L_sensor e LA_sensor estiver igual a 1, faça...
27   //obs.: superfície preta, sensor = 1 (led do sensor apaga)
28   // -- superfície branca, sensor = 0 (led do sensor acende)
29   if (L_sensor == 1 && LA_sensor == 1){
30     LA_sensor = 0;              //retorna a variável LA_sensor para zero
31     voltas++;                   //soma uma unidade na variável voltas
32     rpm = 1/(perodo/6000000.0); //calcula o RPM em função do periodo decorrido
33     Serial.print(" RPM ");
34     Serial.println(rpm);        //imprimi a string (texto + variável)
35     perodo = 0;                 //retorna pra zero a variável periodo
36
37   }
38
39   //SE L_sensor e LA_sensor estiver igual a zero, faça...
40   if (L_sensor == 0 && LA_sensor == 0)
41     LA_sensor = 1;              //retorna a variável LA_sensor para 1
42
43   delay(10);                   //delay para não travar o arduino
44
45 }
46
47 void Timer(){
48   perodo++;                     //soma 1 ao valor atual do periodo
49 }

```

### Apêndice 3 - Colheita de energia em função do preparo físico

Intensidade de Treino	Tempo com $L_1$ (min)	$\Omega_{alt}$ (rpm)	Tempo com $L_2$ (min)	$\Omega_{alt}$ (rpm)	Tempo com $L_3$ (min)	$\Omega_{alt}$ (rpm)	Tempo com $L_4$ (min)	$\Omega_{alt}$ (rpm)	Tempo com $L_5$ (min)	$\Omega_{alt}$ (rpm)	SCE para Treino de 30 min (Wh)	$SCE_{treino}$ (Wh)
Base	10	2000	20	2000	---	---	---	---	---	---	31,9	63,8
Iniciante	5	2000	15	2000	10	1800	---	---	---	---	33,4	66,7
Intermediário	5	2000	5	2100	15	2100	5	2000	---	---	38,7	77,5
Avançado	---	---	5	2100	10	2100	10	2100	5	1800	39,8	79,6
Profissional	---	---	5	2100	10	2100	10	2100	5	2000	40,8	81,5

A intensidade dos treinos vai aumentando escalonadamente em função da quantidade de lâmpadas acesas e do tempo em que o ciclista permanece produzindo neste patamar. O número de lâmpadas foi utilizado durante os testes, mas quando o sistema for montado para o uso, esta condição será substituída para uma condição de escalonamento de capacidade de produção de energia. Este escalonamento pode ser realizado através da limitação de corrente e tensão máxima que cada patamar pode permitir. Um regulador *step-up* poderia ser inserido no lugar de cada lâmpada e substituí-las nesta função de escalonamento de capacidade de produção. Este trabalho não contempla esta substituição, o estudo da inserção destes reguladores *step-up* poderá ser contemplado em estudos futuros.

Para que fosse possível determinar o  $SCE_{treino}$  de cada nível de intensidade de treino, foram estipulados os seguintes parâmetros tempo de permanência nos níveis  $L_i$ , e rotação média do alternador ( $\Omega_{alt}$ ):

- Base: 10 min com esforço extra baixo a 2000 rpm e 20 min com esforço baixo a 2000 rpm;
- Iniciante: 5 min com esforço extra baixo a 2000 rpm, 15 min com esforço baixo a 2000 rpm e 10 min com esforço médio a 1800 rpm;
- Intermediário: 5 min com esforço extra baixo a 2000 rpm, 5 min com esforço baixo a 2100 rpm, 15 min com esforço médio a 2100 rpm e 5 min com esforço alto a 2000 rpm;
- Avançado: 5 min com esforço baixo a 2100 rpm, 10 min com esforço médio a 2100 rpm e 10 min com esforço alto a 2100 rpm e 5 min com esforço muito alto a 1800 rpm;

- Profissional: 5 min com esforço baixo a 2100 rpm, 10 min com esforço médio a 2100 rpm e 10 min com esforço alto a 2100 rpm e 5 min com esforço muito alto a 2000 rpm.

Os valores da coluna *SCE para Treino de 30 min* foram calculados a partir das equações obtidas na regressão linear e os valores da coluna *SCE<sub>treino</sub>* foram calculados a partir da multiplicação de *SCE para Treino de 30* por 2 para se obter o valor da energia produzida em 1h em cada nível de treinamento.

#### Apêndice 4 - Propagação dos erros

Segue tabela contendo as incertezas decorrentes da propagação dos erros de medição.

Variável	Incerteza
$F_D$	1,00%
$F_E$	1,00%
$F_{total}$	0,71%
$F_{result}$	0,71%
$P_{col}$	1,50%
$E_{col}$	1,50%
$Tq_{pediv}$	0,71%
$\Omega_{alt}$ (900 a 2000 rpm)	6,67% a 3,00%
$\Omega_{pediv}$ (150 a 330 rpm)	6,67% a 3,00%
$\Omega_{eixoll}$ (900 a 2000 rpm)	6,67% a 3,00%
$P_{pediv}$	4,85%
$E_{pediv}$	4,85%
$B_{MT}$	4,85%
$\eta_{SCET}$	5,08%
$\eta_{GlobalT}$	5,30%
$SCE_{treino}$	1,50%
$FCE_{prod}$	1,50%
$FCE_{mp}$	1,50%
$FCE_{semanal}$	1,50%
$FCE_{anual}$	1,50%
$FCE_{total}$	1,50%
$QP_{FCE}$	1,50%

Obs.: A incerteza do conversor analógico-digital do Arduino é muito pequena em relação a dos sensores e foi considerada desprezível para os cálculos de propagação dos erros.

## Apêndice 5 - Sketch para ESP 32 – Montagem para uso

```

Rotacao_ESP32_MQTT
1 #include <WiFi.h>
2 #include <AsyncMqttClient.h>
3 #include <AsyncTCP.h>
4
5 // ----- Configuração de rede e MQTT -----
6 const char* ssid = "HSS";
7 const char* password = "Pedro2016";
8
9 const char* mqttServer = "broker.hivemq.com"; //usar ClientID: CLIENTEESP32
10 const int mqttPort = 1883;
11
12 const char* releTopic[5] = {
13   "rele/1",
14   "rele/2",
15   "rele/3",
16   "rele/4",
17   "rele/5"
18 };
19
20 const char* rpmTopic = "rotacao/valor"; // Publicação da rotação
21
22 // Pinos ADC com suporte digital
23 const int relePin[5] = {32, 33, 25, 26, 27};
24
25 AsyncMqttClient mqttClient;
26
27 // ----- Variáveis de rotação -----
28 #define SENSOR_PIN 19
29 #define PULSOS_POR_REV 1
30 #define TIMEOUT_MS 3000
31
32 #define MIN_PULSE_INTERVAL 400000 // 0,4 s = máx ~150 RPM
33 #define N_MEDIDAS 5
34
35 unsigned long intervalos[N_MEDIDAS] = {0};
36 int idx = 0;
37
38 volatile unsigned long lastPulseMicros = 0;
39 volatile unsigned long pulseInterval = 0;
40
41 float lastRpmSent = -1;
42
43 // ----- Funções WiFi e MQTT -----
44 void setupWifi() {
45   WiFi.begin(ssid, password);
46   Serial.print("Conectando ao WiFi");
47   while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
48     delay(500);
49     Serial.print(".");
50   }

```

```

50 }
51 Serial.println("\nWiFi conectado!");
52 }
53
54 void onMqttConnect(bool sessionPresent) {
55     Serial.println("Conectado ao servidor MQTT");
56     for (int i = 0; i < 5; i++) {
57         mqttClient.subscribe(releTopic[i], 1);
58     }
59 }
60
61 void onMqttDisconnect(AsyncMqttClientDisconnectReason reason) {
62     Serial.println("Desconectado do servidor MQTT. Tentando reconectar...");
63     delay(5000);
64     mqttClient.connect();
65 }
66
67 void onMqttMessage(char* topic, char* payload, AsyncMqttClientMessageProperties properties,
68     properties, size_t len, size_t index, size_t total) {
69     String message;
70     for (size_t i = 0; i < len; i++) {
71         message += (char)payload[i];
72     }
73
74     Serial.print("Mensagem recebida em [");
75     Serial.print(topic);
76     Serial.print("]: ");
77     Serial.println(message);
78
79     // Verifica qual relé deve ser acionado
80     for (int i = 0; i < 5; i++) {
81         if (String(topic) == releTopic[i]) {
82             String onCmd = "LR" + String(i + 1);
83             String offCmd = "DR" + String(i + 1);
84
85             if (message == onCmd) {
86                 digitalWrite(relePin[i], HIGH);
87                 Serial.printf("Relé %d ligado\n", i + 1);
88             } else if (message == offCmd) {
89                 digitalWrite(relePin[i], LOW);
90                 Serial.printf("Relé %d desligado\n", i + 1);
91             }
92         }
93     }
94 }
95
96 // ----- Interrupção do sensor -----
97 void IRAM_ATTR onPulse() {
98     unsigned long now = micros();
99     if (lastPulseMicros > 0) {
100         unsigned long intervalo = now - lastPulseMicros;

```

```

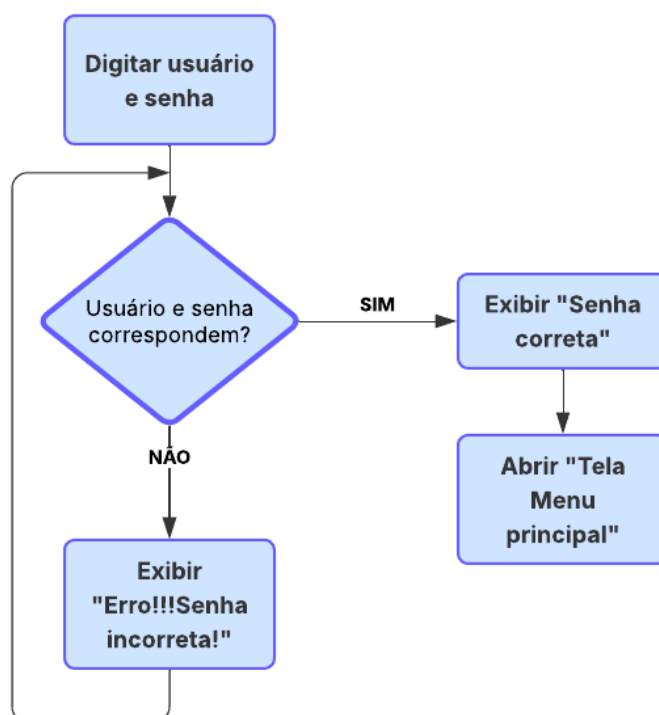
100     unsigned long intervalo = now - lastPulseMicros;
101     if (intervalo > MIN_PULSE_INTERVAL) {
102         pulseInterval = intervalo;
103         intervalos[idx] = intervalo;
104         idx = (idx + 1) % N_MEDIDAS;
105         lastPulseMicros = now;
106     }
107 } else {
108     lastPulseMicros = now;
109 }
110 }
111
112 // ----- Setup -----
113 void setup() {
114     Serial.begin(115200);
115
116     for (int i = 0; i < 5; i++) {
117         pinMode(relePin[i], OUTPUT);
118         digitalWrite(relePin[i], LOW);
119     }
120
121     pinMode(SENSOR_PIN, INPUT_PULLUP);
122     attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(SENSOR_PIN), onPulse, FALLING);
123
124     setupWifi();
125
126     mqttClient.onConnect(onMqttConnect);
127     mqttClient.onDisconnect(onMqttDisconnect);
128     mqttClient.onMessage(onMqttMessage);
129     mqttClient.setServer(mqttServer, mqttPort);
130     mqttClient.connect();
131 }
132
133 // ----- Loop -----
134 void loop() {
135     unsigned long now = millis();
136     float rpm = 0;
137
138     noInterrupts();
139     unsigned long lastPulseCopy = lastPulseMicros;
140     interrupts();
141
142     if ((millis() - (lastPulseCopy / 1000)) > TIMEOUT_MS) {
143         rpm = 0;
144     } else {
145         unsigned long soma = 0;
146         int count = 0;
147         for (int i = 0; i < N_MEDIDAS; i++) {

```

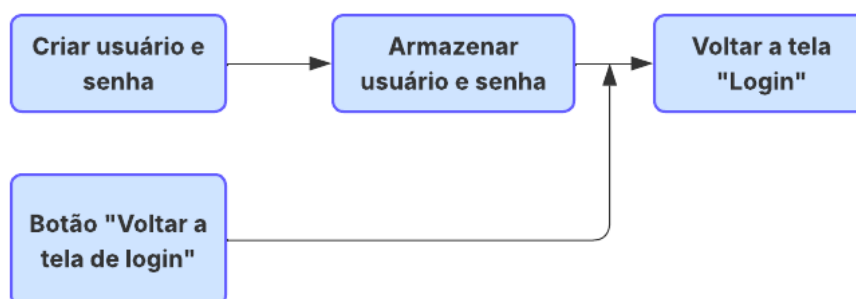
```
147     for (int i = 0; i < N_MEDIDAS; i++) {
148         if (intervalos[i] > 0) {
149             soma += intervalos[i];
150             count++;
151         }
152     }
153     if (count > 0) {
154         float media = (float)soma / count;
155         float freqHz = 1e6 / media;
156         rpm = (60.0 * freqHz) / PULSOS_POR_REV;
157     }
158 }
159
160 if ((int)rpm != (int)lastRpmSent) {
161     Serial.print("RPM: ");
162     Serial.println((int)rpm);
163     lastRpmSent = rpm;
164
165     if (mqttClient.connected()) {
166         String msg = String((int)rpm);
167         mqttClient.publish(rpmTopic, 1, true, msg.c_str());
168     }
169 }
170
171 delay(200); // evita flood no MQTT
172 }
```

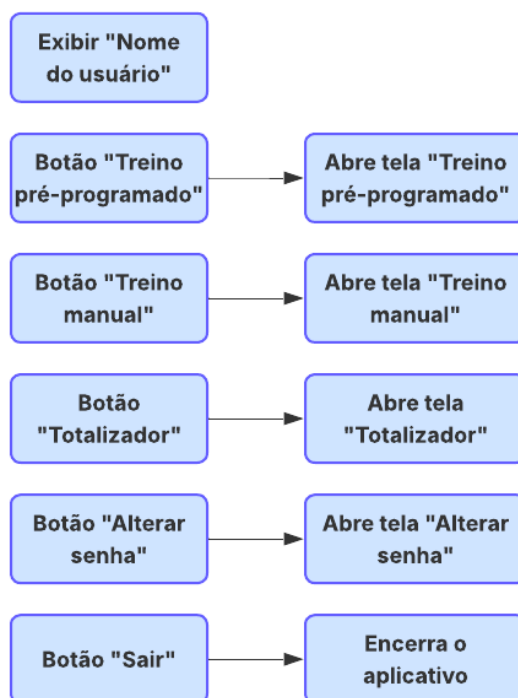
## Apêndice 6 - Programação da tela "Login" e "Cadastro de novo usuário" do aplicativo

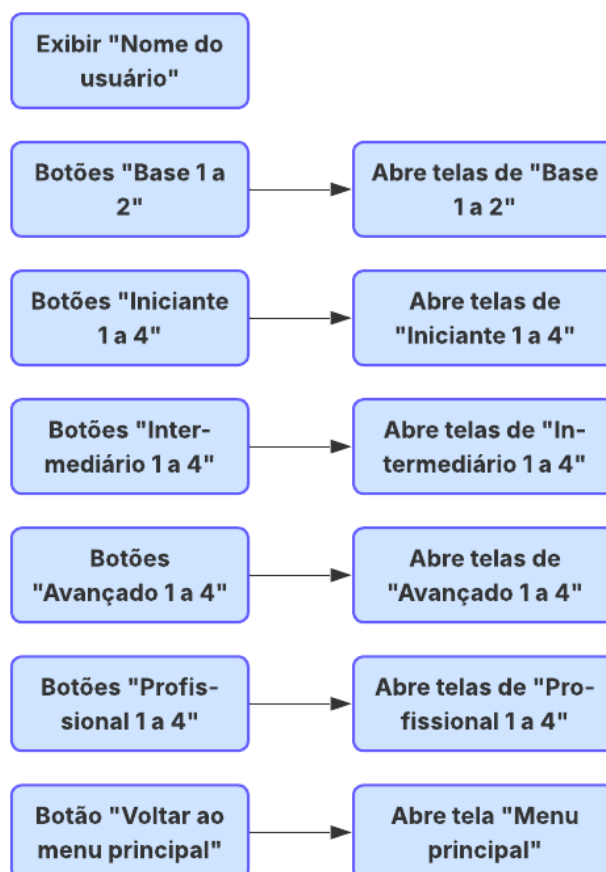
### a) Tela "Login"



### b) Tela "Cadastro de novo usuário"

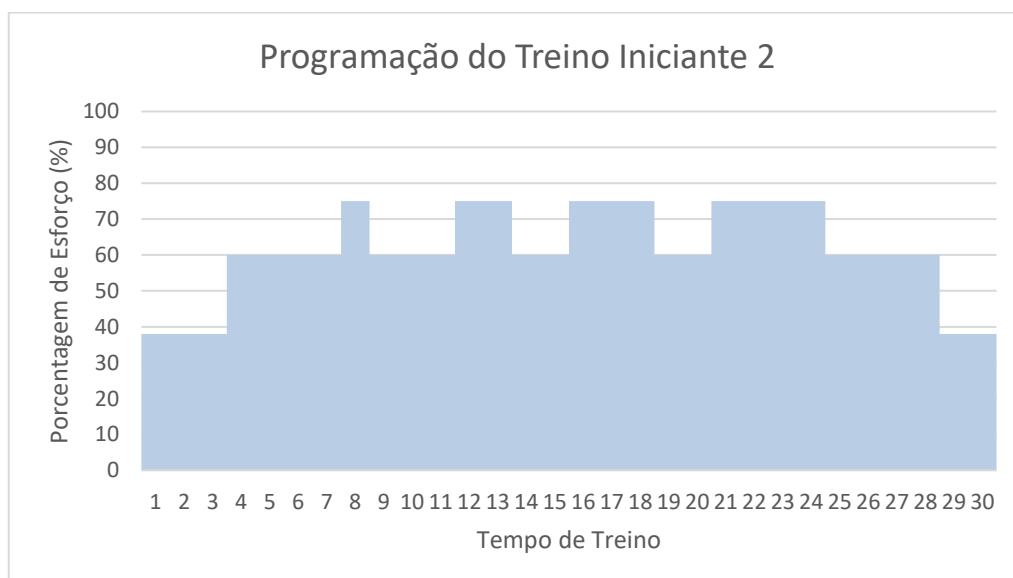
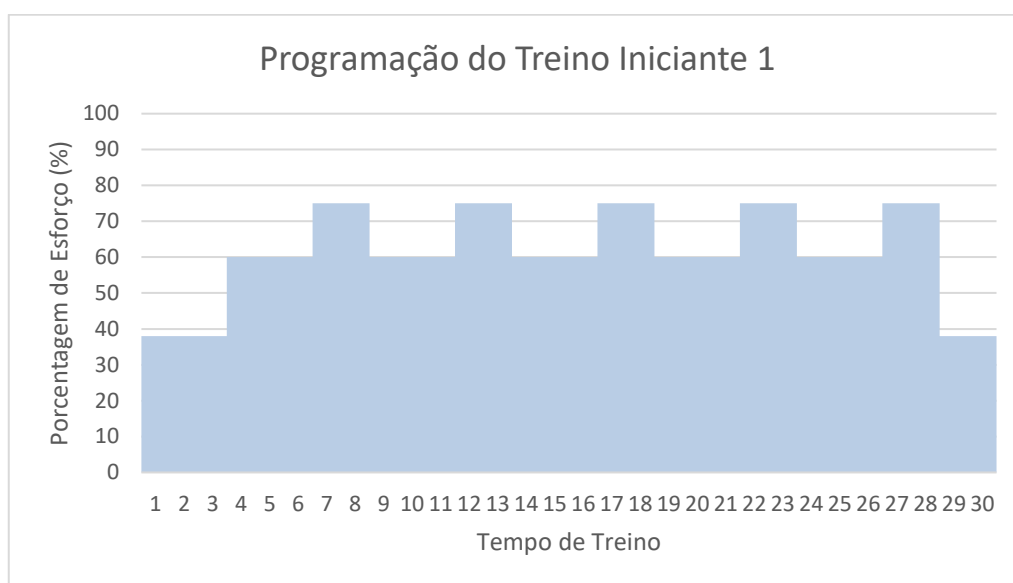


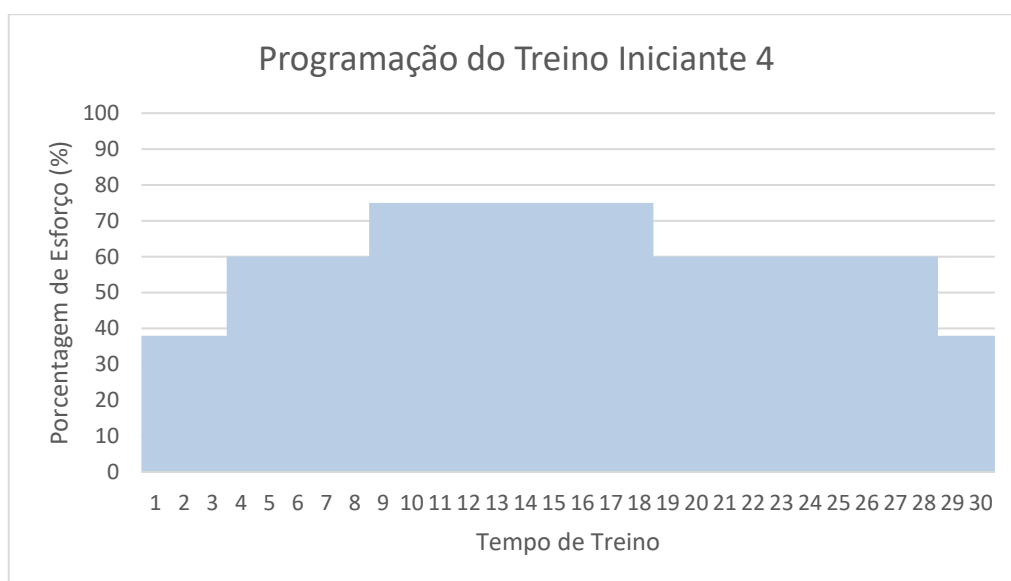
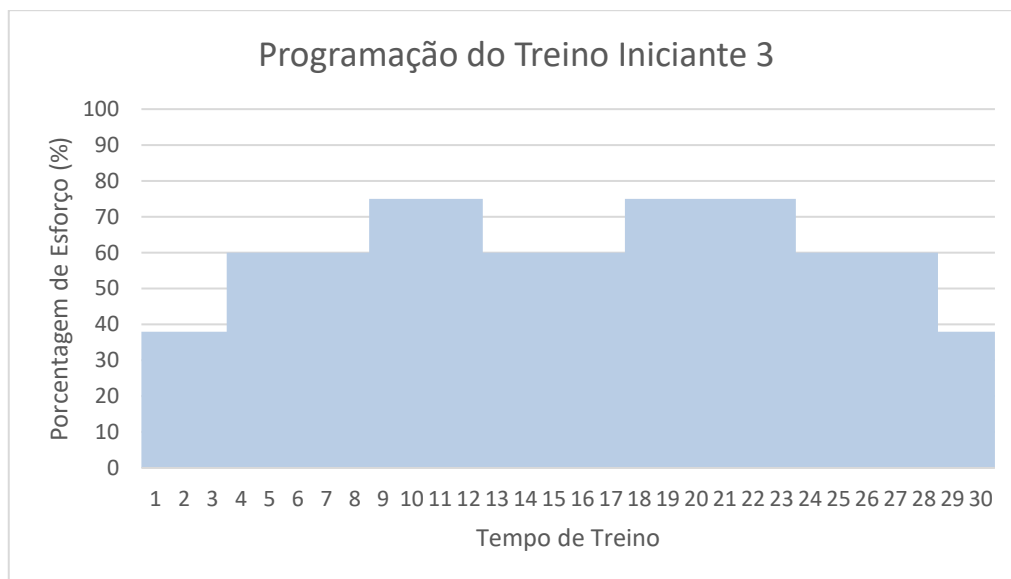
**Apêndice 7 - Programação da tela "Menu Principal" do aplicativo**

**Apêndice 8 - Programação da tela "Treino Pré-Programado" do aplicativo**

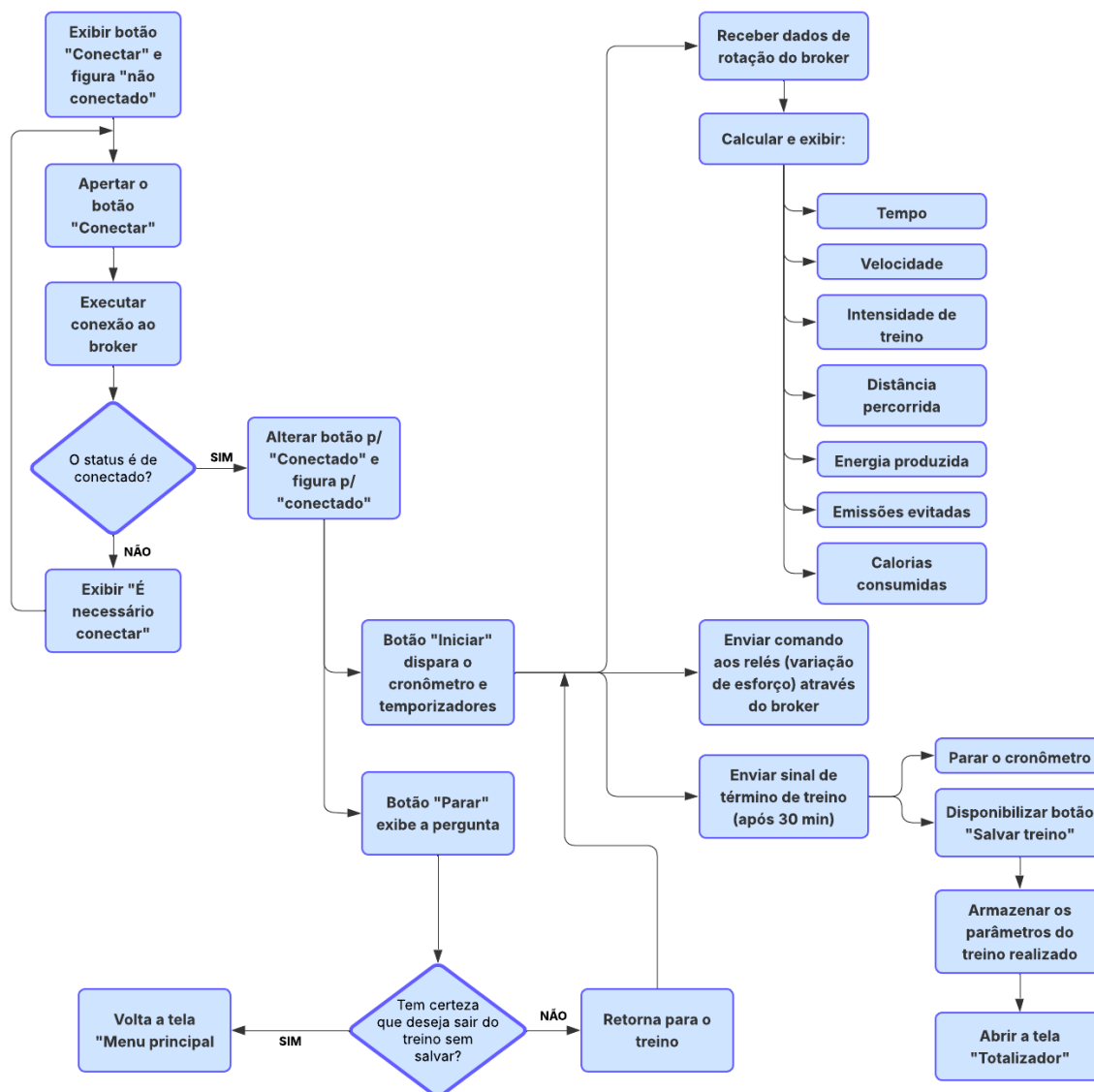
## Apêndice 9 - Variação dos treinos de Iniciante

Todos os treinos do nível “Iniciante” possuem o mesmo total de tempo em cada nível, a diferença entre os treinos está na sequência em que ela ocorre. Os outros níveis de treino também possuem estas variações, cada uma no seu patamar de intensidade. Os gráficos abaixo demonstram a variação dos treinos pré-programados do nível “Iniciante”



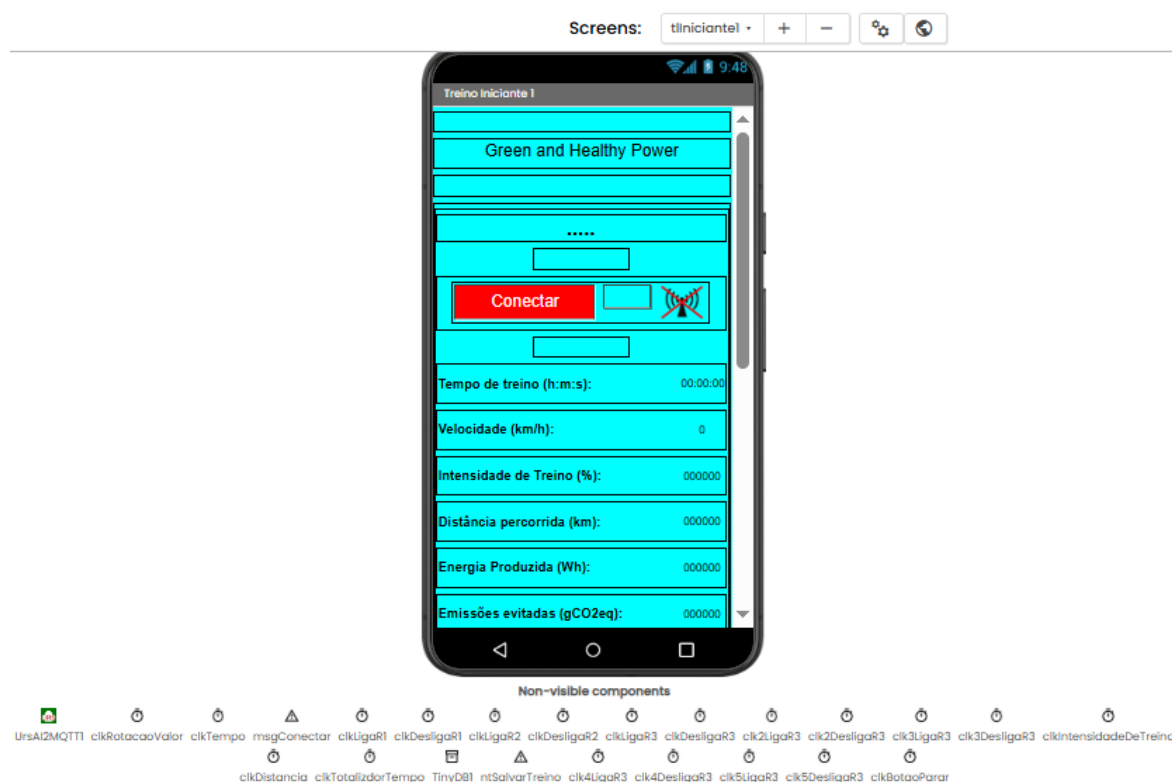


## Apêndice 10 - Programação da tela "Iniciante1" do aplicativo.



## Apêndice 11 - Automação dos Treinos Pré-Programados

A figura abaixo exibe a tela do App Inventor contendo, na parte inferior, todos os *clocks* utilizados na tela “Iniciante 1”.

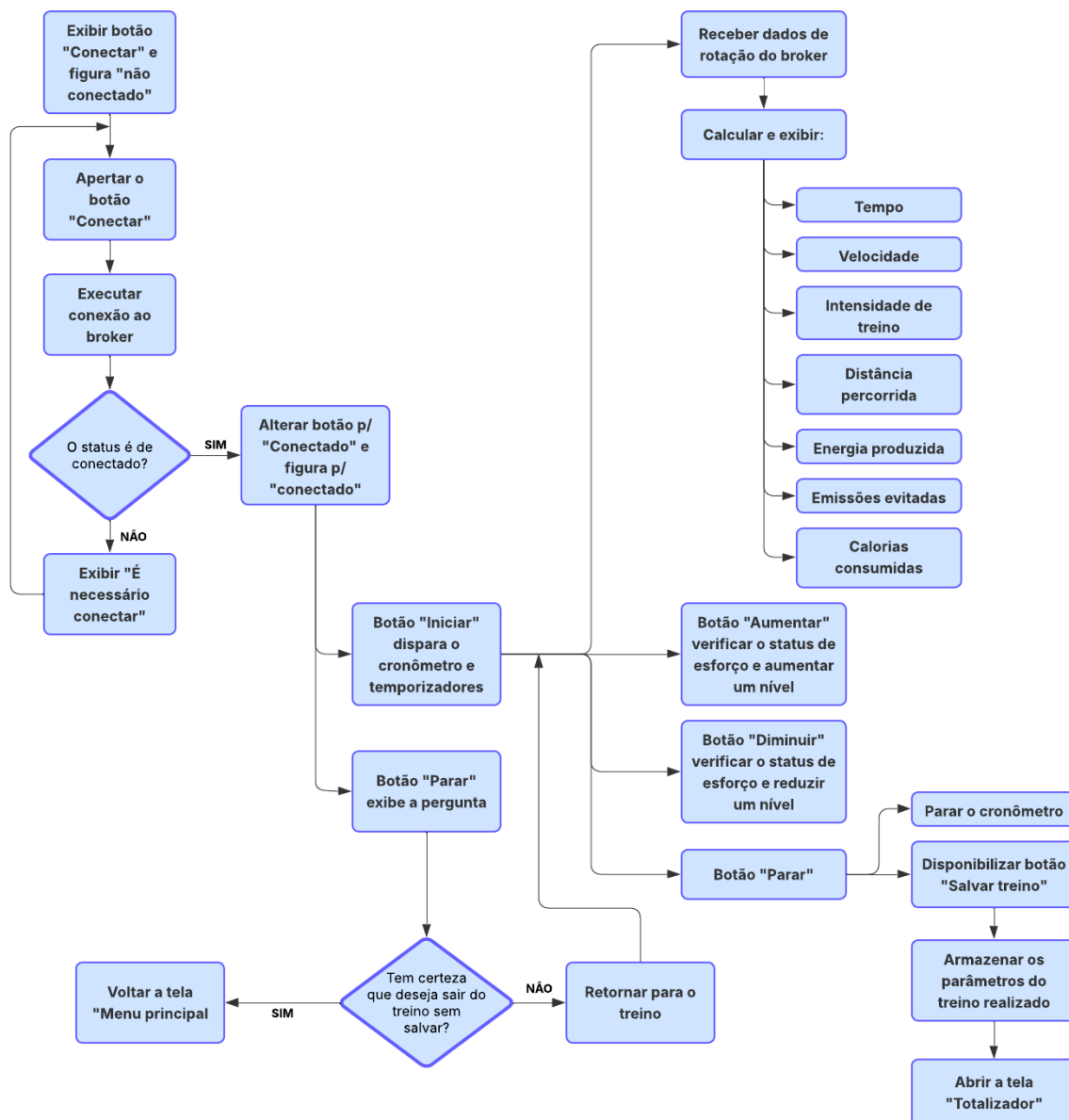


Segue abaixo a configuração de cada *clock* utilizado na automação do treino.

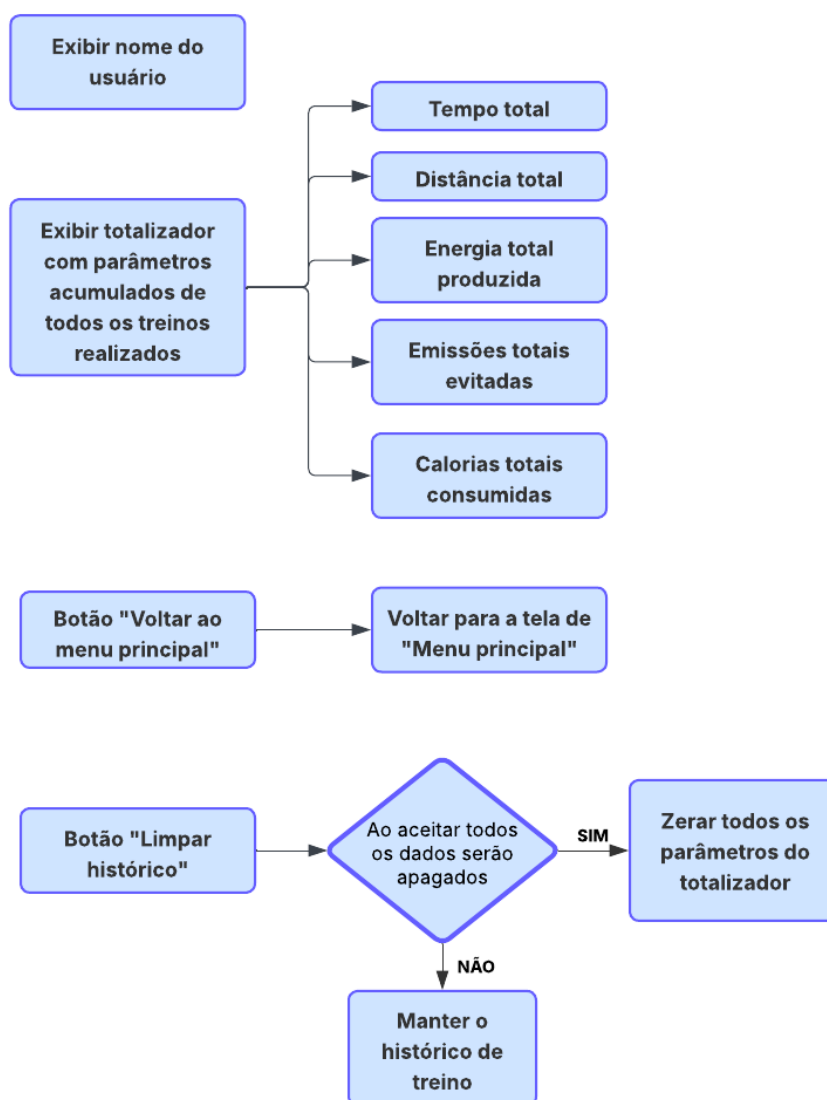
clkLigar1	clkDesligaR1	clkLigar2
<b>▼ Behavior</b> TimerAlwaysFires <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/> TimerEnabled <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/> TimerInterval <sup>(?)</sup> <input type="text" value="100"/>	<b>▼ Behavior</b> TimerAlwaysFires <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/> TimerEnabled <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/> TimerInterval <sup>(?)</sup> <input type="text" value="1800000"/>	<b>▼ Behavior</b> TimerAlwaysFires <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/> TimerEnabled <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/> TimerInterval <sup>(?)</sup> <input type="text" value="240000"/>

<p>clkDesligaR2</p> <p>▼ Behavior</p> <p>TimerAlwaysFires <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/></p> <p>TimerEnabled <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/></p> <p>TimerInterval <sup>(?)</sup> <input type="text" value="1680000"/></p>	<p>clkLigaR3</p> <p>▼ Behavior</p> <p>TimerAlwaysFires <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/></p> <p>TimerEnabled <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/></p> <p>TimerInterval <sup>(?)</sup> <input type="text" value="420000"/></p>	<p>clkDesligaR3</p> <p>▼ Behavior</p> <p>TimerAlwaysFires <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/></p> <p>TimerEnabled <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/></p> <p>TimerInterval <sup>(?)</sup> <input type="text" value="480000"/></p>
<p>clk2LigaR3</p> <p>▼ Behavior</p> <p>TimerAlwaysFires <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/></p> <p>TimerEnabled <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/></p> <p>TimerInterval <sup>(?)</sup> <input type="text" value="660000"/></p>	<p>clk2DesligaR3</p> <p>▼ Behavior</p> <p>TimerAlwaysFires <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/></p> <p>TimerEnabled <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/></p> <p>TimerInterval <sup>(?)</sup> <input type="text" value="780000"/></p>	<p>clk3LigaR3</p> <p>▼ Behavior</p> <p>TimerAlwaysFires <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/></p> <p>TimerEnabled <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/></p> <p>TimerInterval <sup>(?)</sup> <input type="text" value="960000"/></p>
<p>clk3DesligaR3</p> <p>▼ Behavior</p> <p>TimerAlwaysFires <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/></p> <p>TimerEnabled <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/></p> <p>TimerInterval <sup>(?)</sup> <input type="text" value="1140000"/></p>	<p>clk4LigaR3</p> <p>▼ Behavior</p> <p>TimerAlwaysFires <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/></p> <p>TimerEnabled <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/></p> <p>TimerInterval <sup>(?)</sup> <input type="text" value="1320000"/></p>	<p>clk4DesligaR3</p> <p>▼ Behavior</p> <p>TimerAlwaysFires <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/></p> <p>TimerEnabled <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/></p> <p>TimerInterval <sup>(?)</sup> <input type="text" value="1440000"/></p>
<p>clk5LigaR3</p> <p>▼ Behavior</p> <p>TimerAlwaysFires <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/></p> <p>TimerEnabled <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/></p> <p>TimerInterval <sup>(?)</sup> <input type="text" value="1620000"/></p>	<p>clk5DesligaR3</p> <p>▼ Behavior</p> <p>TimerAlwaysFires <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/></p> <p>TimerEnabled <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/></p> <p>TimerInterval <sup>(?)</sup> <input type="text" value="1680000"/></p>	<p>clkBotaoParar</p> <p>▼ Behavior</p> <p>TimerAlwaysFires <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/></p> <p>TimerEnabled <sup>(?)</sup> <input type="checkbox"/></p> <p>TimerInterval <sup>(?)</sup> <input type="text" value="1800000"/></p>

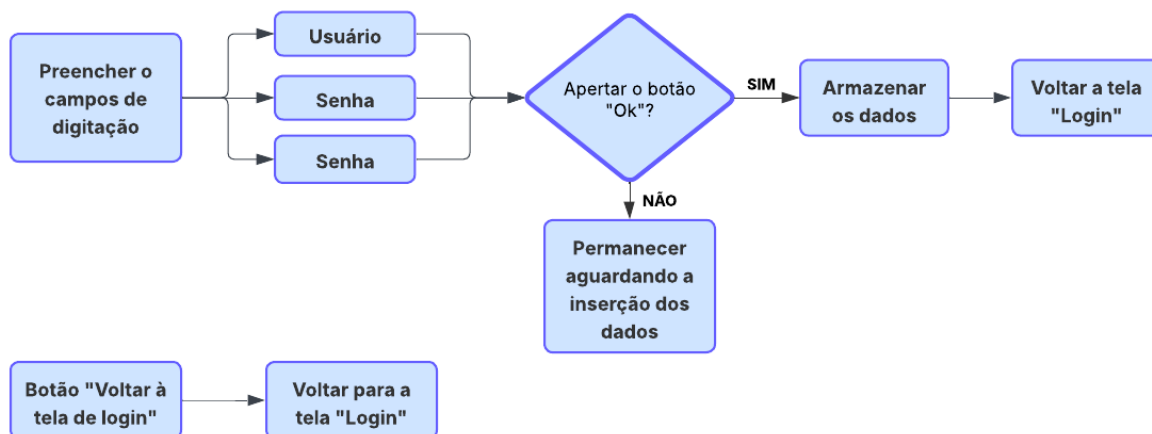
## Apêndice 12 - Programação da tela "Treino com Controle Manual" do aplicativo



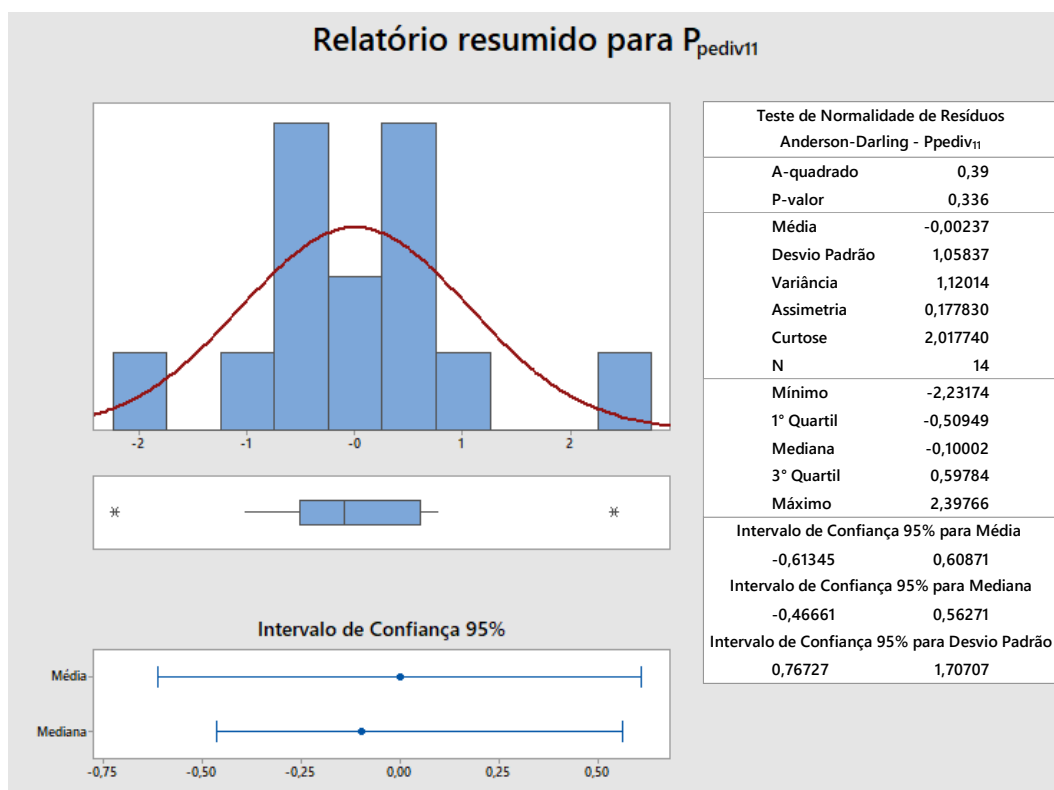
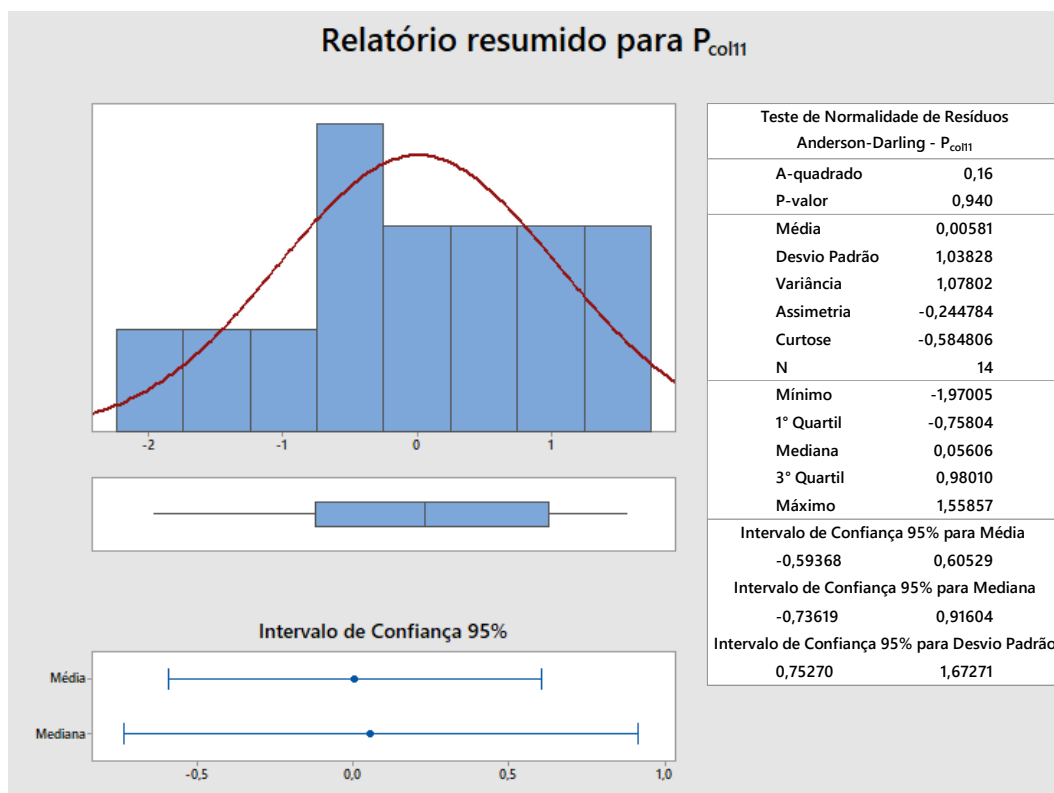
## Apêndice 13 - Programação da tela "Totalizador" do aplicativo



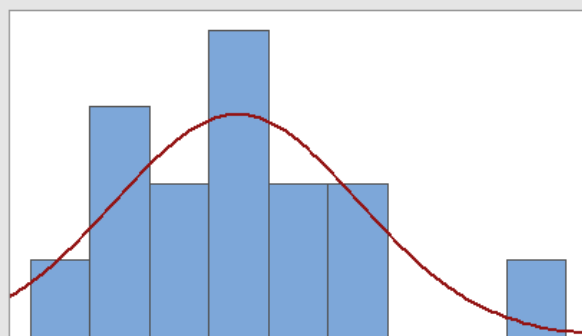
## Apêndice 14 - Programação da tela "Alteração de Usuário e Senha" do aplicativo



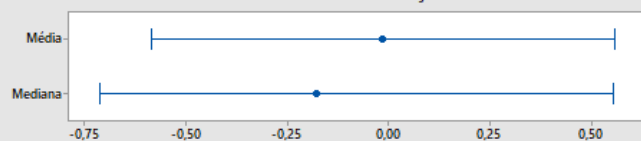
## Apêndice 15 - Gráficos de Normalidade Anderson-Darling



### Relatório resumido para $P_{col12}$



#### Intervalo de Confiança 95%



#### Teste de Normalidade de Resíduos Anderson-Darling - $P_{col12}$

A-quadrado	0,44
P-valor	0,255
Média	-0,01581
Desvio Padrão	1,03215
Variância	1,06533
Assimetria	1,257110
Curtose	2,219350
N	15
Mínimo	-1,26206
1° Quartil	-0,76077
Mediana	-0,18165
3° Quartil	0,59821
Máximo	2,69369

#### Intervalo de Confiança 95% para Média

-0,58740      0,55577

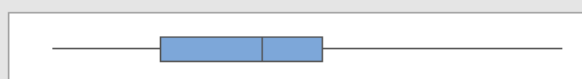
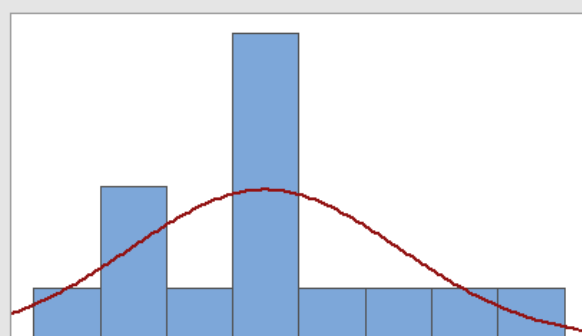
#### Intervalo de Confiança 95% para Mediana

-0,71349      0,55555

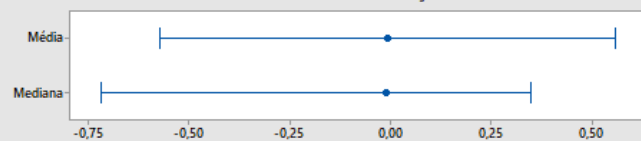
#### Intervalo de Confiança 95% para Desvio Padrão

0,75566      1,62780

### Relatório resumido para $P_{pediv12}$



#### Intervalo de Confiança 95%



#### Teste de Normalidade de Resíduos Anderson-Darling - $P_{pediv12}$

A-quadrado	0,28
P-valor	0,602
Média	-0,01028
Desvio Padrão	1,02125
Variância	1,04294
Assimetria	0,561188
Curtose	0,367018
N	15
Mínimo	-1,59328
1° Quartil	-0,78207
Mediana	-0,01151
3° Quartil	0,43651
Máximo	2,23869

#### Intervalo de Confiança 95% para Média

-0,57583      0,55527

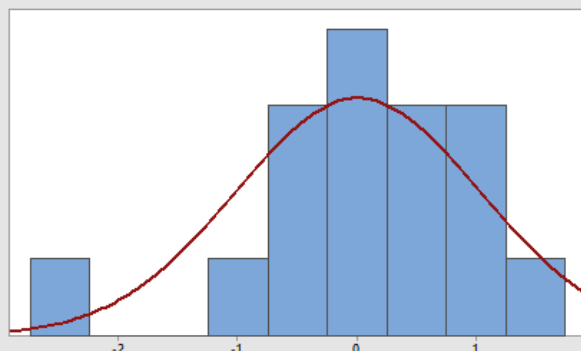
#### Intervalo de Confiança 95% para Mediana

-0,71942      0,34824

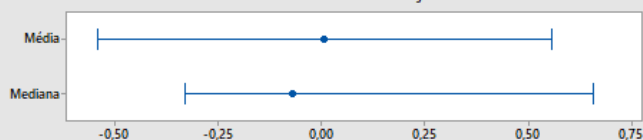
#### Intervalo de Confiança 95% para Desvio Padrão

0,74768      1,61061

### Relatório resumido para $P_{col13}$



Intervalo de Confiança 95%



#### Teste de Normalidade de Resíduos Anderson-Darling - $P_{col13}$

A-quadrado	0,35
P-valor	0,416
Média	0,00489
Desvio Padrão	1,03119
Variância	1,06336
Assimetria	-0,970300
Curtose	1,851350
N	16
Mínimo	-2,66434
1° Quartil	-0,50305
Mediana	-0,07344
3° Quartil	0,81193
Máximo	1,58310

## Intervalo de Confiança 95% para Média

-0,54460      0,55437

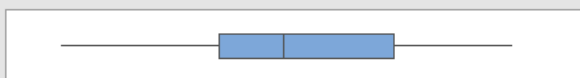
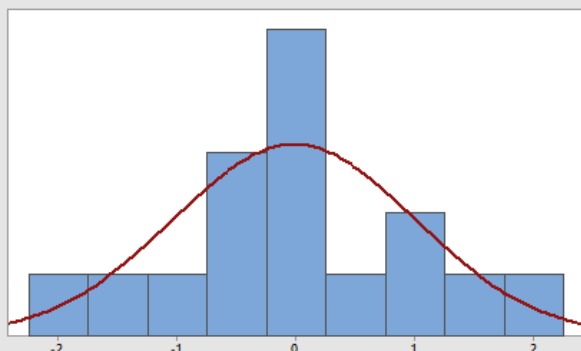
## Intervalo de Confiança 95% para Mediana

-0,33307      0,65590

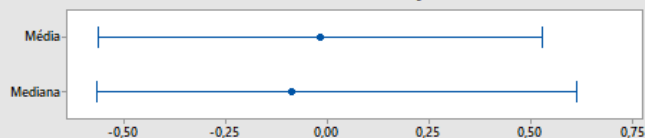
## Intervalo de Confiança 95% para Desvio Padrão

0,76175      1,59597

### Relatório resumido para $P_{pediv13}$



Intervalo de Confiança 95%



#### Teste de Normalidade de Resíduos Anderson-Darling - $P_{pediv13}$

A-quadrado	0,20
P-valor	0,857
Média	-0,01840
Desvio Padrão	1,02457
Variância	1,04973
Assimetria	0,139941
Curtose	-0,152154
N	16
Mínimo	-1,96143
1° Quartil	-0,63763
Mediana	-0,08918
3° Quartil	0,83898
Máximo	1,83173

## Intervalo de Confiança 95% para Média

-0,56435      0,52755

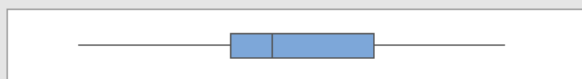
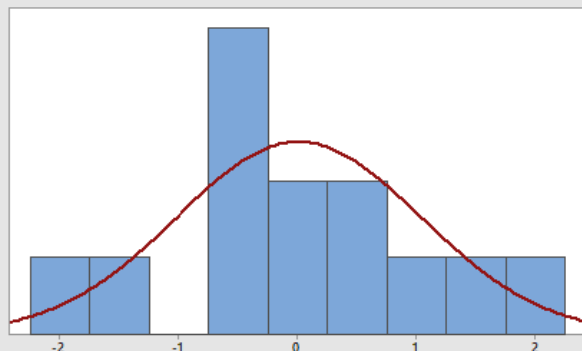
## Intervalo de Confiança 95% para Mediana

-0,56807      0,61308

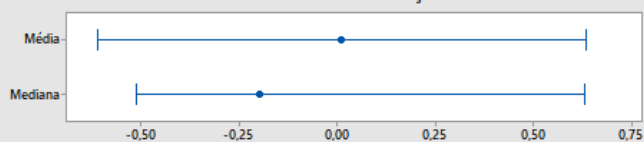
## Intervalo de Confiança 95% para Desvio Padrão

0,75685      1,58571

### Relatório resumido para $P_{col14}$



Intervalo de Confiança 95%



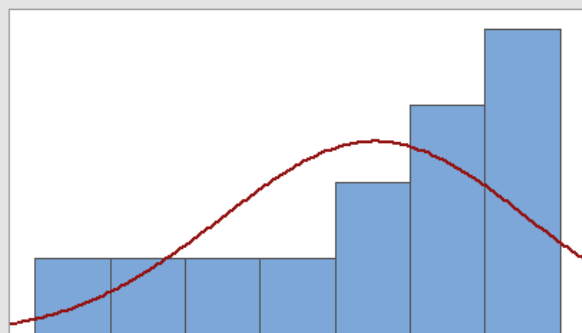
#### Teste de Normalidade de Resíduos Anderson-Darling - $P_{col14}$

A-quadrado	0,20
P-valor	0,838
Média	0,00906
Desvio Padrão	1,03326
Variância	1,06764
Assimetria	0,099370
Curtose	-0,147844
N	13

Mínimo	-1,83133
1° Quartil	-0,54847
Mediana	-0,20210
3° Quartil	0,66300
Máximo	1,75053

Intervalo de Confiança 95% para Média	-0,61533	0,63346
Intervalo de Confiança 95% para Mediana	-0,51398	0,62970
Intervalo de Confiança 95% para Desvio Padrão	0,74094	1,70565

### Relatório resumido para $P_{pediv14}$



Intervalo de Confiança 95%

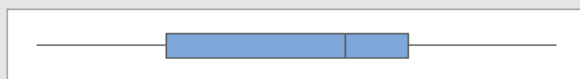
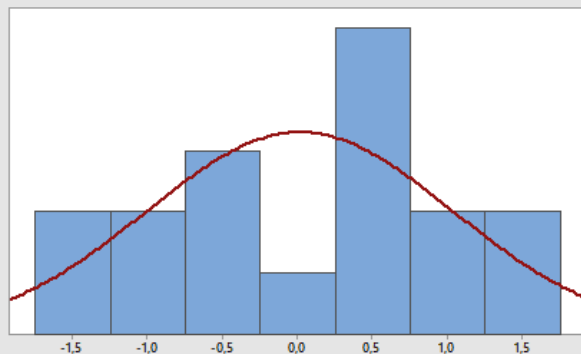


#### Teste de Normalidade de Resíduos Anderson-Darling - $P_{pediv14}$

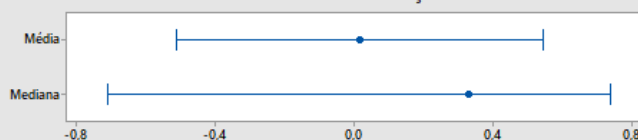
A-quadrado	0,50
P-valor	0,171
Média	0,01449
Desvio Padrão	1,02414
Variância	1,04886
Assimetria	-0,960460
Curtose	0,084915
N	13

Mínimo	-2,11693
1° Quartil	-0,71175
Mediana	0,32149
3° Quartil	0,84742
Máximo	1,14797

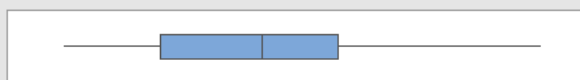
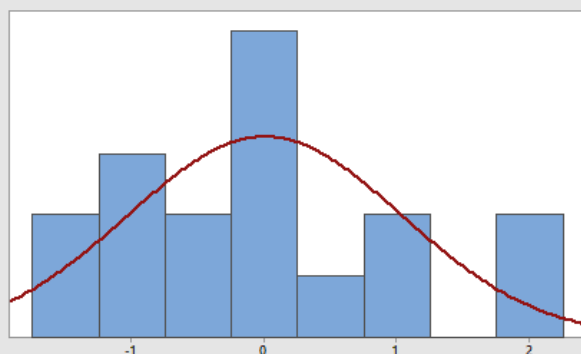
Intervalo de Confiança 95% para Média	-0,60440	0,63337
Intervalo de Confiança 95% para Mediana	-0,59935	0,81298
Intervalo de Confiança 95% para Desvio Padrão	0,73440	1,69058

Relatório resumido para  $P_{col15}$ 

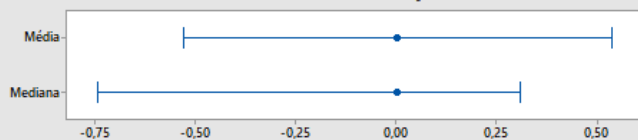
Intervalo de Confiança 95%

Teste de Normalidade de Resíduos  
Anderson-Darling -  $P_{col15}$ 

A-quadrado	0,25
P-valor	0,694
Média	0,01442
Desvio Padrão	1,03050
Variância	1,06193
Assimetria	-0,110828
Curtose	-0,948623
N	17
Mínimo	-1,72391
1° Quartil	-0,86064
Mediana	0,33047
3° Quartil	0,74920
Máximo	1,73717
Intervalo de Confiança 95% para Média	
-0,51542	0,54425
Intervalo de Confiança 95% para Mediana	
-0,71122	0,73813
Intervalo de Confiança 95% para Desvio Padrão	
0,76749	1,56835

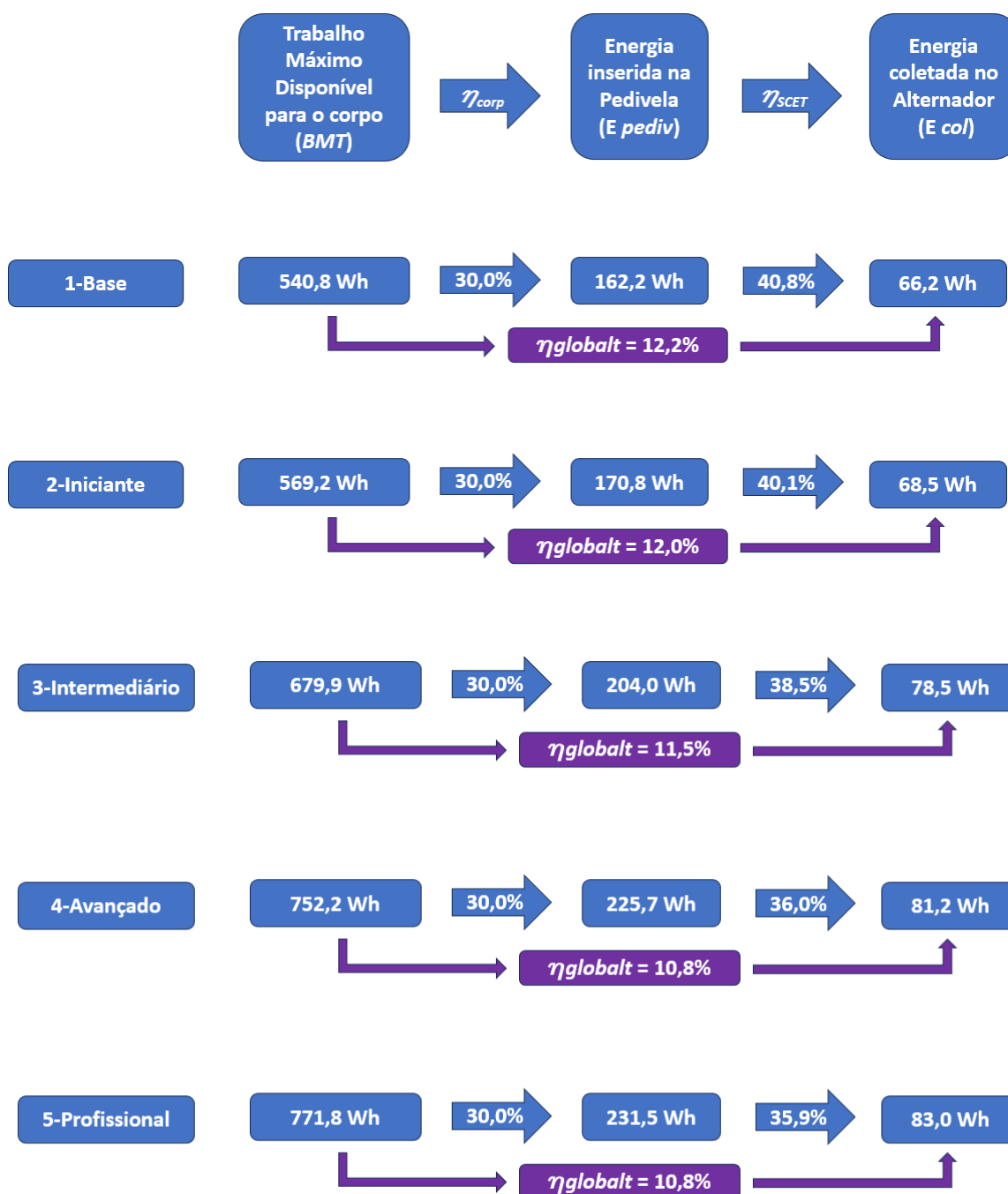
Relatório resumido para  $P_{pediv15}$ 

Intervalo de Confiança 95%

Teste de Normalidade de Resíduos  
Anderson-Darling -  $P_{pediv15}$ 

A-quadrado	0,30
P-valor	0,546
Média	0,00171
Desvio Padrão	1,03688
Variância	1,07512
Assimetria	0,576594
Curtose	-0,148855
N	17
Mínimo	-1,49619
1° Quartil	-0,77290
Mediana	-0,00034
3° Quartil	0,56972
Máximo	2,08844
Intervalo de Confiança 95% para Média	
-0,53141	0,53482
Intervalo de Confiança 95% para Mediana	
-0,74476	0,53482
Intervalo de Confiança 95% para Desvio Padrão	
0,77224	1,57806

## Apêndice 16 - Rendimento Global para todos os Níveis de Treino



**Apêndice 17 - Fator de emissões de GEE de cada material**

<b>Item</b>	<b>Emissões (kg CO<sub>2</sub>-eq/kg)</b>
Aço, de baixa liga, laminado a quente	2,26
Liga de alumínio, AlMg <sub>3</sub>	9,24
Cromo	28,47
Borracha Sintética	2,77
Cobre	8,01
Estanho	1,26
Fibra de vidro	2,29
Graxa	1,42
Latão	6,78
Cloreto de polivinila, polimerizado em massa	20,78
Resina epóxi	4,74
Silício, grau eletrônico	81,55
Zinco	2,72

## Apêndice 18 - Variação do $TE_{mix}$ brasileiro

Fonte	Fator de Emissão (kg CO <sub>2</sub> eq/kWh)	Participação de cada fonte							
		2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Biomassa	0,16149	0,78%	0,71%	0,63%	0,93%	0,83%	0,74%	0,75%	3,67%
Carvão	2,69664	1,75%	2,05%	0,83%	3,38%	3,02%	1,31%	0,74%	1,30%
Óleo	1,43376	2,66%	2,78%	2,24%	1,94%	3,91%	2,51%	1,56%	0,19%
Gás natural	0,75614	6,51%	7,44%	4,75%	10,74%	11,03%	8,98%	3,03%	4,38%
Hidrelétrica	0,09810	79,70%	77,13%	80,20%	74,59%	66,97%	73,54%	76,47%	62,18%
Nuclear	0,01610	2,84%	2,74%	2,61%	2,20%	2,59%	2,77%	2,78%	2,36%
Solar	0,10609	0,01%	0,35%	0,74%	0,84%	0,99%	1,56%	2,66%	10,60%
Eólica	0,02007	5,75%	6,80%	8,00%	5,38%	10,66%	8,59%	12,01%	15,32%
Total		100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Fonte	Fator de emissão de cada fonte (kg CO <sub>2</sub> eq/kWh)							
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Biomassa	0,0013	0,0011	0,0010	0,0015	0,0013	0,0012	0,0012	0,0059
Carvão	0,0472	0,0553	0,0224	0,0911	0,0814	0,0353	0,0200	0,0351
Óleo	0,0381	0,0399	0,0321	0,0278	0,0561	0,0360	0,0224	0,0027
Gás natural	0,0492	0,0563	0,0359	0,0812	0,0834	0,0679	0,0229	0,0331
Hidrelétrica	0,0782	0,0757	0,0787	0,0732	0,0657	0,0721	0,0750	0,0610
Nuclear	0,0005	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
Solar	0,0000	0,0004	0,0008	0,0009	0,0011	0,0017	0,0028	0,0112
Eólica	0,0012	0,0014	0,0016	0,0011	0,0021	0,0017	0,0024	0,0031
Total	0,2156	0,2304	0,1729	0,2772	0,2915	0,2164	0,1471	0,1525



Fonte: Adaptado de Oliveira, Delgado e Carvalho (2024)

### Apêndice 19 - Cálculo das emissões geradas por kg de proteína

A taxa de emissões de GEE por kg de proteína será a multiplicação das emissões de GEE do alimento multiplicada pela porcentagem de proteína contida no alimento.

<b>Fonte de proteína</b>	<b>Emissões de GEE do alimento [kg CO<sub>2</sub>-eq/kg]</b>	<b>Porcentagem de proteína contida no alimento [%]</b>	<b>Emissões de GEE por kg de proteína [kg CO<sub>2</sub>-eq/kg]</b>
Aves	2,09	31	6,73
Carne bovina	35,08	26	134,91
Feijão	0,62	7	8,86
Peixes marinhos	2,60	22	11,82
Queijos frescos	12,40	10	124,00
Whey Protein	14,50	80	18,13
Ovo	4,08	13	32,40
Tofu	0,99	8	12,31
Proteína Isolada de Soja	4,85	85	5,71
Concentrado de soja	8,10	65	12,46

As emissões de GEE de todos os alimentos foram obtidos a partir do SimaPro v.9.6.0.1, com exceção do feijão que foi obtido de Clune, Crossin e Verghese (2017), por não estar na base de dados do SimaPro.