

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANDRÉ LUIS MACAGNAN
JOÃO AUGUSTO RODRIGUES NETO
RAFAEL NUNES NETO**

**DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA TRAÇÃO
HUMANA NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE
UMA BICICLETA ERGOMÉTRICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

ANDRÉ LUIS MACAGNAN
JOÃO AUGUSTO RODRIGUES NETO
RAFAEL NUNES NETO

**DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA TRAÇÃO
HUMANA NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE
UMA BICICLETA ERGOMÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – DAELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Me. Ednilson Soares Maciel

**ANDRÉ LUIS MACAGNAN
JOÃO AUGUSTO RODRIGUES NETO
RAFAEL NUNES NETO**

DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA TRAÇÃO HUMANA NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE UMA BICICLETA ERGOMÉTRICA

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 23 de Novembro de 2016.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa Annemarlen G. Castagna, Dr.
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Prof. M. Sc. Ednilson Soares Maciel
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Profa. M. Sc. Mariana A. Aguiar Furucho
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. M. Dr. Bruno Akihiro Tano Yamamura
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. M. Sc. Jaime Favretto
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho aos nossos pais, amigos e familiares, que sempre nos incentivaram e estiveram ao nosso lado.

“Seja quem você for, qualquer posição que você tenha na vida – nível altíssimo ou mais baixo, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e, sempre, faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá”

Ayrton Senna, 1990.

RESUMO

MACAGNAN, André Luis. NETO, João Augusto Rodrigues. NETO, Rafael Nunes. Determinação da Eficiência Energética da Tração Humana na Geração de Energia Elétrica Através de Uma Bicicleta Ergométrica. 2016. 87f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

O presente trabalho tem como finalidade analisar a eficiência na geração de energia elétrica a partir de uma bicicleta ergométrica movida pela ação humana. Tendo como base trabalhos anteriores que mostram a possibilidade de geração de energia a partir do movimento da pedalada em bicicletas com geradores acoplados, buscou-se analisar a relação entre a energia mecânica aplicada em uma célula de carga instalada em cada pedal e a energia elétrica gerada no terminais de um gerador CA com imã permanente. A conexão entre o gerador e os pedais se deu por meio de polias e correias e a energia gerada foi transferida a uma carga resistiva. Foi necessário o desenvolvimento de um circuito amplificador, utilizando o CI LM 741, para a coleta de dados da célula de carga, e a utilização de 2 transdutores para a coleta de dados da carga resistiva. Todos os dados coletados foram enviados a uma interface e posteriormente tratados no software LabVIEW, e em uma planilha do Excel. Através das medições realizadas, comprovou-se que o rendimento deste processo de transferência de energia é significativo e viável de ser implementado em situações práticas do cotidiano, mas ainda existem melhorias que podem ser feitas no sistema, tais como a troca do gerador, melhor fixação, troca do retificador, entre outras.

Palavras-chave: Sustentabilidade, geração alternativa, bicicleta ergométrica, eficiência energética.

ABSTRACT

MACAGNAN, André Luis. NETO, João Augusto Rodrigues. NETO, Rafael Nunes. Determination of The Energy Efficiency of Human Traction in The Generation of Electric Energy Through a Spinning Bicycle. 2016. 87f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

The present work aims to analyze the efficiency in the electric energy's generation from a ergometric bicycle driven by human action. Based on previous studies that show the possibility of generating energy from pedal movement on bicycles with coupled generators, it was sought to analyze the relation between the mechanical energy applied in a load cell installed in each pedal and the generated energy from the movement of the pedal on bicycles with coupled generators, it was sought to analyze the relationship between the mechanical energy applied in a load cell installed on each pedal and the electric energy generated in the terminals of a permanent magnet AC generator. The connection between the generator and the pedals occurred through pulleys and belts, and the generated energy was transferred to a resistive load. It was necessary to develop an amplifier circuit, using the LM 741 IC, for the data collection of the load cell, and the use of 2 transducers for the data collection of the resistive load. Every data collected was sent to an interface and later processed in LabVIEW software and an Excel spreadsheet. Through the measurements performed, it was verified that the yield of this process of energy transfer is significant and feasible to be implemented in practical situations of daily life, but there are still improvements that can be made to the system, such as changing the generator, better fixing, replacing the rectifier, and others.

Keywords: Sustainability, alternative generating, ergometric bicycle, energy efficiency.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo de energia em Kcal/h para diversas atividade	14
Tabela 2 - Comparação entre máquinas	34
Tabela 3 - Especificação técnica da célula de carga.....	53
Tabela 4 - Valores de calibração das células de carga.	67
Tabela 5 – Rendimentos calculados.	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Bicicleta adaptada com alternador.....	16
Figura 2 - Estrutura mecânica de apoio	17
Figura 3 - Teste do protótipo	17
Figura 4 – Bicicleta adaptada ao gerador.....	20
Figura 5 - Gerador elementar de campo e bobina girantes.....	23
Figura 6 - Foto ilustrativa de máquina elétrica com rotor e estator.....	25
Figura 7 - Aspectos construtivos do gerador síncrono.....	26
Figura 8 - Máquina de imã permanente.....	29
Figura 9 - Esquema do gerador assíncrono.....	30
Figura 10 - Ponte de Wheatstone.....	38
Figura 11 - Esquema de um circuito elétrico de um AmpOP.....	39
Figura 12 – Explicação dos dispositivos que compõe um AmpOP.....	39
Figura 13 - Pinagem do CI LM 741.....	40
Figura 14 - Transdutores de corrente e tensão	42
Figura 15 - Tela de aquisição de dados LabVIEW	43
Figura 16 - Circuito retificador monofásico onda completa	44
Figura 17 - Circuito retificador trifásico onda completa.....	44
Figura 18 - Sistema bicicleta ergométrica	46
Figura 19 – Esquema básico de estudo	48
Figura 20 - Circuito elétrico equivalente e de coleta de dados do sistema proposto.....	48
Figura 21 - Foto do protótipo bicicleta ergométrica.....	50
Figura 22 - Bicicleta Ergométrica.....	51
Figura 23 - Célula de carga Líder.....	52
Figura 24 - Modo de fixação da célula de carga.....	53
Figura 25 - Fixação da célula de carga no pedal.....	54
Figura 26 - Fixação dos cabos de saída das células de carga.....	55
Figura 27 – Placa de circuito para os amplificadores operacionais.....	56
Figura 28 - Caixa de aquisição de dados com os amplificadores.....	57
Figura 29 - Máquina elétrica utilizada como gerador.....	58
Figura 30 - Detalhe de fixação do gerador e conexão com polia	58
Figura 31 - Detalhes do retificador de onda completa em ponte utilizado.....	59
Figura 32 - Conexão gerador / retificador / carga.....	59
Figura 33 - Detalhe da lâmpada incandescente.....	60
Figura 34 - Transdutores de corrente e tensão utilizados no experimento.....	61
Figura 35 - Linha de programação do LabVIEW, com o destaque das	62
Figura 36 – Placa de aquisição utilizada.....	63
Figura 37 - Diagrama esquemático de aquisição e tratamento de dados.....	65
Figura 38 - Filtro e constantes em pu na linha de programação do	66

Figura 39 - Calibração com anilhas de 5 kgf cada.	67
Figura 40 - Gráfico LabVIEW.	69
Figura 41 - Gráfico Força e Potência.	70
Figura 42 - Gráfico FFT.	71
Figura 43 - Identificação dos elementos do movimento	73
Figura 44 - Desenho esquemático com a descrição das forças atuantes no	73
Figura 45 – Gráfico Força no pedal e Potencia gerada (indivíduo 1 - 55,56 rpm) ...	75
Figura 46 – Gráfico Força no pedal e Potencia gerada (indivíduo 1 - 56,28 rpm) ...	76
Figura 47 – Gráfico Força no pedal e Potencia gerada (indivíduo 1 – 81,04 rpm) ...	77
Figura 48 – Gráfico Força no pedal e Potencia gerada (indivíduo 2 – 53,16 rpm) ...	78
Figura 49 – Gráfico Força no pedal e Potencia gerada (indivíduo 2 – 59,41 rpm) ...	78
Figura 50 – Gráfico Força no pedal e Potencia gerada (indivíduo 2 – 75,05 rpm) ...	79
Figura 51 – Gráfico Força no pedal e Potencia gerada (indivíduo 3 – 52,98 rpm) ...	80
Figura 52 – Gráfico Força no pedal e Potencia gerada (indivíduo 3 – 59,41rpm) ...	80
Figura 53 – Gráfico Força no pedal e Potencia gerada (indivíduo 3 – 68,80 rpm) ...	81

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1. TEMA	13
1.1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA	15
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	18
1.3 OBJETIVOS	19
1.3.1 OBJETIVO GERAL	19
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.4 JUSTIFICATIVA	19
2 EMBASAMENTO TEÓRICO	22
2.1 GERADORES DE ENERGIA E SUA APLICABILIDADE ÀS BICICLETAS	22
2.2 POSSIBILIDADES DE GERADORES	24
2.2.1 Princípio de funcionamento das máquinas elétricas	24
2.2.2 Aspectos construtivos dos geradores elétricos	25
2.3 GERADORES DE CORRENTE ALTERNADA	26
2.3.1 Gerador síncrono	26
2.3.2 Análise quanto à utilização do gerador síncrono na bicicleta ergométrica	28
2.3.3 Gerador síncrono de ímã permanente	28
2.3.4 Análise quanto à utilização do gerador síncrono na bicicleta ergométrica	29
2.3.5 Gerador assíncrono	30
2.3.6 Análise quanto à utilização do gerador assíncrono na bicicleta ergométrica	31
2.4 GERADORES DE CORRENTE CONTÍNUA	31
2.4.1 Análise quanto à utilização do gerador de corrente contínua na bicicleta ergométrica	32
2.4.2 Conclusões quanto ao gerador a ser utilizado	33
2.4.3 Rendimento no processo de geração de energia	35
2.5 CÉLULA DE CARGA	37
2.6 AMPLIFICADOR OPERACIONAL	38
2.7 TRANSDUTORES DE CORRENTE E TENSÃO	41
2.8 SOFTWARE LABVIEW	42
2.9 RETIFICADOR	43
3 MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA	46
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS E PROCEDIMENTOS DE MONTAGEM	47
3.2.1 Bicicleta Ergométrica	49
3.2.2 Célula de Carga	51
3.2.3 Amplificador Operacional	55
3.2.4 Gerador	57

3.2.5 Retificador.....	59
3.2.6 Lâmpada Incandescente.....	60
3.2.7 Transdutores de tensão e de corrente.....	61
3.2.8 Placa de Aquisição.....	62
3.3 DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO GERAL DO SISTEMA E METODOLOGIA DE COLETA DE DADOS.....	65
3.3.1 Calibração do sistema.....	65
3.3.2 Aquisição dos dados.....	68
3.3.3 Tratamento dos dados.....	69
4 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	75
4.1 AQUISIÇÃO PARA O PRIMEIRO INDIVÍDUO.....	75
4.2 AQUISIÇÃO PARA O SEGUNDO INDIVÍDUO.....	77
4.3 AQUISIÇÃO PARA O TERCEIRO INDIVÍDUO.....	79
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83
REFERÊNCIAS.....	85

1 INTRODUÇÃO

1.1. TEMA

Os avanços científicos e tecnológicos que acompanham a humanidade desde a sua origem, vem proporcionando ao homem uma vida mais longa e confortável, e conseqüentemente, tem aumentando a densidade populacional e a procura por recursos naturais. (GABRIEL LOPES, 2009).

Grande parte destes recursos naturais são utilizados como fontes de energia, como por exemplo, os combustíveis fósseis que são fontes não renováveis e vem intensificando o aquecimento global, pela emissão de carbono na atmosfera, e os problemas ecológicos decorrentes deste. Devido à crescente preocupação com as questões ambientais, o homem tem procurado alternativas, e uma delas tem sido a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias que se utilizem de fontes renováveis em seu escopo, pois além de agredir menos o ambiente, são consideradas inesgotáveis pela sua capacidade de se regenerar. (NICHELLE JUNIOR, 2010).

Dentre as principais fontes de energia renováveis temos a energia solar, biomassa, energia eólica, energia hídrica e muitas outras que vem sendo desenvolvidas e são divulgadas constantemente nos noticiários e nas comunidades científicas. Além de serem consideradas “energias limpas”, apresentam também a vantagem de estarem disponíveis as comunidades mais afastadas dos grandes centros urbanos, que pela distancia, acabam que por não sendo abastecidas pelos atuais sistemas de distribuição de energia elétrica. (WOLFANG PALZ, 2002).

Na busca por geração de energia de uma maneira limpa, segura e sustentável, muitas pesquisas tem se realizado no sentido de se aproveitar a energia gasta pelo homem em suas atividades cotidianas para a geração de energia elétrica. A partir da Tabela 01 abaixo, é possível se ter uma noção quantitativa dos valores despendidos em Kcal/h pelo homem em algumas atividades.

Tabela 1 - Consumo de energia em Kcal/h para diversas atividade

NIVEL DE TRABALHO	ATIVIDADE	kcal/hora
TRABALHO LEVE	Escrever	20
	Permanecer relaxado	20
	Datilografar rapidamente	55
	Tocar violino	40 - 50
	Lavar louça	60
	Passar ferro	60
TRABALHO MODERADO	Tomar banho	125 - 215
	Trabalho de carpintaria	150 - 1180
	Caminhar	130 - 240
TRABALHO PESADO	Marchar	280
	Andar de bicicleta	180 - 600
	Remar	120 - 600
	Nadar	200 - 700
TRABALHO MUITO PESADO	Quebrar pedras	350
	Correr	800 - 1000
	Escalar montanhas	400 - 900
	Esquiar	500 - 950
	Subir escadas	1000

Fonte: Adaptado de Goldberg e Villanueva (2003, p.44).

Com estes dados é possível se ter uma noção do quanto de energia estamos desperdiçando todos os dias, e que se de alguma forma utilizássemos esse potencial energético de outra maneira, teríamos em mãos a oportunidade de nos tornar cada vez mais sustentáveis e com isso, reduzir o consumo e a dependência pelas atuais fontes de energia. (JANSEN E STEVELS, 2006).

Nesse sentido, alguns exemplos práticos já vêm fazendo parte do cotidiano de algumas pessoas. Alguns estabelecimentos comerciais tem aproveitado o potencial humano na transformação de energia. É o caso de uma academia de Portland, Estados Unidos, que tem como princípio norteador a sustentabilidade. Em um projeto idealizado como “The Green Microgym” (o microgym verde), seu criador, Adam Boesel, criou uma máquina capaz de converter exercícios físicos em energia elétrica e conectá-los a rede, isto é, com esse equipamento é possível gerar energia para a própria academia, diminuindo assim a conta de luz em 20% aproximadamente. (CONDOMÍNIOS VERDES, 2015).

Inspirado nesta academia sustentável, um juiz da cidade de Santa Rita do Sapucaí, região sul de Minas Gerais, juntamente com o diretor de um presídio da

cidade, criaram dentro do mesmo uma unidade geradora de energia elétrica através de 4 bicicletas, que foram adaptadas para transformar a energia mecânica das pedaladas dos presidiários em energia elétrica e assim, a princípio, acender 8 lâmpadas de uma avenida da cidade, projeto este, que após uma ampliação, irá iluminar toda a avenida. (RUBENS, 2012).

Como descrito no texto acima, muito se tem pesquisado e criado a respeito da geração de energia elétrica através do aproveitamento do esforço humano em suas atividades diárias, mas nada tem sido feito no sentido de se quantificar a eficiência desta transformação de energia. O que será feito neste trabalho, portanto, é a determinação da eficiência energética entre a energia gasta pelo homem em uma atividade física específica (pedalar uma bicicleta ergométrica), e a energia elétrica útil gerada através desta transformação.

1.1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Atualmente, as questões ambientais se tornaram mais relevantes nas tomadas de decisões, sejam elas políticas, econômicas ou sociais, isso porque, a utilização dos recursos naturais e todo o processo de transformação destes recursos em bens de consumo, vêm causando impactos nocivos ao meio.

A energia move o mundo, e uma das questões que mais tem preocupado governos e sociedade, é a crescente demanda energética para sustentação do sistema sobre o qual está estruturada nossa sociedade, fazendo-se necessário obter formas e processos que melhorem o aproveitamento deste recurso.

Segundo Ramos e Setúbal (2013), acompanhando a crescente demanda do consumo de eletricidade e havendo o interesse da sociedade pela conscientização da produção de energias renováveis e consumo consciente, a Universidade Federal do Pará em parceria com a empresa Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A (ELETRO NORTE), desenvolveu um projeto para a geração elétrica a partir do esforço físico em bicicleta, com a adaptação de um alternador, no eixo traseiro da bicicleta, como elemento de variação de fluxo na geração.



Figura 1 - Bicicleta adaptada com alternador.
Fonte: Ramos e Setúbal, (2013).

Este sistema se mostrou eficiente como forma de se obter a energia disponível e aproveitar a interação entre o homem e os objetos que o cercam para se obter algum tipo de energia útil.

Seguindo esta linha de pensamento, o aproveitamento da energia mecânica de giro dos pedais em energia elétrica pode ser utilizada em pequenos sistemas de consumo. Um protótipo simples para este tipo de bicicleta, é adaptar no lugar do alternador uma máquina mais eficiente, como por exemplo um gerador ou motor que funcione como tal, substituindo a corrente por correias, entre outras coisas.

De acordo com Silva e Fantí (2010), um equipamento para a realização de exercícios físicos que recupere a energia cinética gasta pelo usuário armazenando-a pode ser utilizada em aparelhos eletrônicos de baixa potência como mp3 players, celulares, laptops.

Em estudo realizado pela USP, adotou-se um gerador acoplado a uma bicicleta de forma a mantê-la na posição vertical e, assim, rotacionar um eixo, por contato com o pneu, possibilitando a transformação de energia cinética em energia química em uma bateria, conforme Figuras 2 e 3.

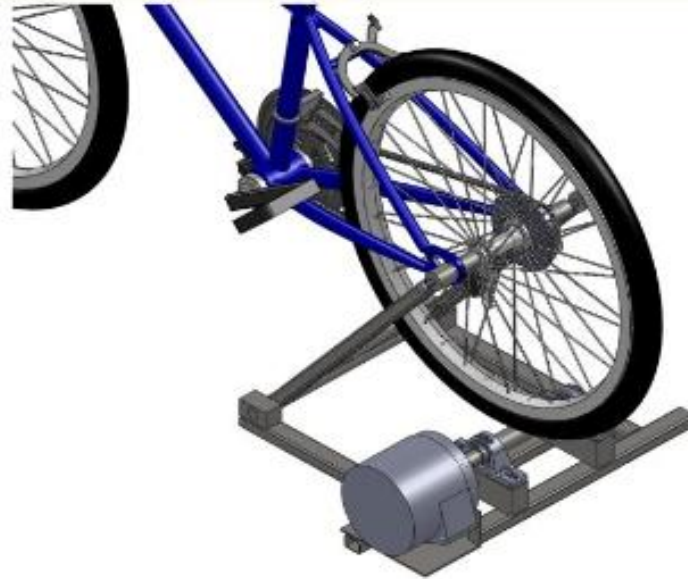


Figura 2 - Estrutura mecânica de apoio
Fonte: Silva e Fanti, USP (2010).



Figura 3 - Teste do protótipo
Fonte: Silva e Fanti, USP (2010).

Ao se pedalar a bicicleta, o giro do eixo acoplado com o gerador gera energia elétrica, que por sua vez é armazenada na bateria na forma de corrente contínua, que posteriormente será convertida em corrente alternada para ser aproveitada na rede de consumo.

De forma a se obter mais eficiência ao sistema, pode-se alterar o modelo de geração trocando o arranjo de materiais que diminuam o atrito e as perdas do sistema. No lugar da bicicleta comum utiliza-se uma bicicleta ergométrica, ao invés

de correntes pode-se colocar correias, e os pneus trocar por polias e rolamentos, tornando-se assim, um sistema mais eficiente.

Com o objetivo de determinar a eficiência deste modelo de geração, ou seja, medir a energia aplicada aos pedais e obter a energia fornecida no gerador por unidade de tempo, serão adaptadas aos pedais de uma bicicleta ergométrica, células de carga para aquisição da força aplicada durante a atividade física, e com isto, será avaliado quanto de energia esta sendo transferida ao mesmo. Medindo a energia elétrica gerada e com o cálculo da energia transferida pela pessoa à bicicleta, será determinada a eficiência deste sistema de geração.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Até que ponto vale manter o mesmo nível de conforto e comodidade que as atuais tecnologias nos trazem, em detrimento de uma natureza cada vez mais frágil e esgotada? Mudanças no clima e atmosfera do planeta vêm se intensificando na mesma proporção das nossas necessidades por uma vida mais sedentária e tranquila. (GABRIEL LOPES, 2009).

Os efeitos negativos causados à saúde por essa inatividade física também são preocupantes. Cerca de 70% da população adulta mundial não atinge os níveis de atividade física recomendados para a idade, o que vem se tornando um problema público de saúde. Só nos Estados Unidos, os gastos devido a esses efeitos são da ordem de um trilhão de dólares por ano. (BOOTH, GORDON, CARLSON & HAMILTON, 2000).

Em contrapartida, tem se intensificado o número de pessoas que frequentam academias, vão de bicicleta ao trabalho, correm diariamente, etc. São conhecidos como “geração saúde”, e suas atitudes diárias trazem ao meio em que vivem profundas transformações. Aproveitando o embalo destas, e visando estimular seus atos, queremos responder através deste projeto perguntas como: **Qual o rendimento na geração de energia elétrica através de uma bicicleta ergométrica? Que parcela da energia humana é efetivamente convertida em energia elétrica?**

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

Quantificar a energia mecânica transformada em energia elétrica e indicar como melhorar o rendimento (energia mecânica utilizada/energia elétrica gerada) de uma bicicleta ergométrica.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Medir os valores de energia mecânica aplicada ao sistema (RPM, força e torque);
- Medir os valores de energia elétrica retirada do sistema;
- Adaptar programa LabVIEW para aquisição de dados do sistema;
- Calibrar os equipamentos de medição;
- Tratar os dados levantados em planilha Excel;
- Calcular o rendimento do sistema;
- Identificar as mudanças que podem ser realizadas para uma melhoria do sistema;

1.4 JUSTIFICATIVA

Devido o aumento do consumo de energia elétrica, se faz necessário que aconteça uma maior variação na matriz energética, porém a mudança de paradigma é algo extremamente complexo e demorado. No entanto, mudanças pontuais no tipo de fonte de energia utilizada, podem ajudar no processo de transformação ou

mesmo na redução de custos. Alterações no tipo de fonte geradora demandam um determinado custo na aquisição e na instalação. Quanto menor o custo, menor será o tempo em que a redução no consumo compensará o gasto com a implantação.

Portanto, a mudança nos tipos de geração de eletricidade que reaproveitem energia que já produzimos diariamente torna-se importante na busca por um estilo de vida autossustentável.

Com a adaptação de um gerador de energia elétrica em uma bicicleta ergométrica, conforme mostra a Figura 4, é possível a geração de energia por meio da aplicação de força nos pedais da bicicleta.



Figura 4 – Bicicleta adaptada ao gerador
Fonte: Batista e Brambilla (2010).

A energia que anteriormente se desperdiçava com o esforço físico pode ser utilizada para alimentação de componentes como sensores, sistema de iluminação dos *displays* utilizados pelos mesmos e ainda a possível alimentação de algumas outras pequenas cargas, ex: lâmpadas de baixo consumo, resistências, entre outras. (BATISTA e BRAMBILLA 2010).

Dentro deste panorama que inseriremos nossa pesquisa. Para tanto, a fonte geradora pesquisada será uma bicicleta ergométrica, tendo como inovação a obtenção do menor custo e melhor rendimento possível de conversão de energia para o sistema bicicleta/gerador e nosso sistema não utilizará correias e catracas para movimento de giro, mas polias e correias que diminuem o atrito.

A pesquisa se focará na obtenção dos valores numéricos de energia mecânica aplicada ao sistema e quanto dessa energia mecânica pode ser transformada em energia elétrica útil.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 GERADORES DE ENERGIA E SUA APLICABILIDADE ÀS BICICLETAS

Em termos simples, geradores de energia elétrica são máquinas capazes de converter energia mecânica em energia elétrica. De acordo com Kosow (1972, p. 02) “A primeira indicação da possibilidade de intercâmbio entre energia elétrica e mecânica foi apresentada por Michael Faraday em 1831”. A partir deste princípio, foram criadas diversas maneiras de se aproveitar a energia mecânica existente na natureza (quedas d’água, energia eólica, etc.), ou obtida através de algum processo térmico ou químico (geração de vapor a alta pressão através da queima de combustíveis fósseis ou da reação de fissão ou fusão nuclear, etc.), para se realizar este processo de conversão.

Motor e gerador são máquinas reversíveis, isto é, quando se aplica uma tensão elétrica em um motor obtém-se uma força mecânica em seu eixo, ao contrário, se seu eixo for girado a certa velocidade, o campo magnético induz uma tensão elétrica em suas bobinas, esse motor passa então a trabalhar como um gerador. Um motor é uma máquina que converte energia elétrica em energia mecânica de rotação. O gerador, por sua vez, é uma máquina que converte energia mecânica de rotação em energia elétrica.

Para Carvalho (2006, p. 167), o gerador pode ter dois aspectos construtivos, a bobina girante ou o campo girante. No primeiro um “rotor bobinado” gira dentro de um campo magnético “estator”, surgindo então nos terminais do “coletor” uma tensão induzida.

No caso do campo girante obtém-se efeito inverso, onde o rotor passa a ser o campo magnético, e as bobinas do “estator” sofrem ação deste campo induzindo assim uma tensão em seus terminais, (BATISTA E BRAMBILLA, 2010).

O funcionamento do campo girante pode ser observado como descrito o gerador elementar na Figura 5.

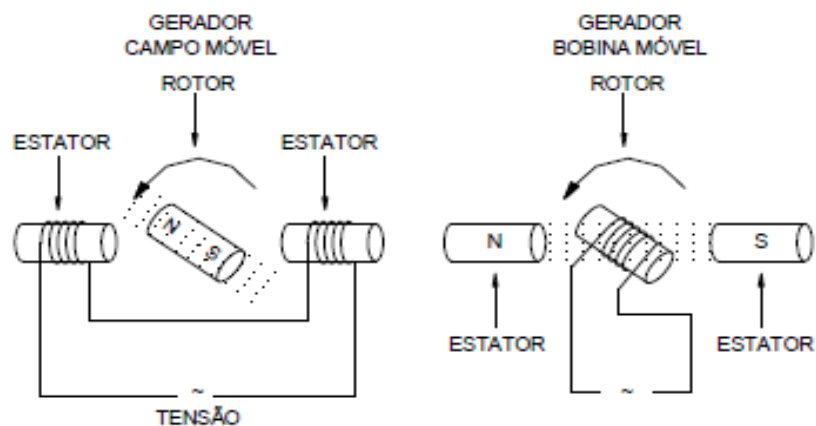


Figura 5 - Gerador elementar de campo e bobina girantes.
Fonte: Adaptado de Kosow (1982).

Em nossa proposta de trabalho, a conversão de energia mecânica em elétrica será realizada por intermédio de uma máquina elétrica instalada em uma bicicleta ergométrica. Neste processo, a energia mecânica será fornecida pela pessoa que aplica uma força aos pedais desta bicicleta, e com isso promove a rotação do eixo do gerador, gerando com isso energia elétrica. O foco do trabalho será medir o rendimento deste processo de conversão.

A máquina, portanto, é o elemento principal do nosso estudo, pois é por meio dele que a conversão de energia é realizada, e sua escolha correta será determinante nos resultados obtidos. Dentre os vários existentes, este precisa se enquadrar na situação problema, isto é, precisa ser independente de alimentações elétricas externas, e deve permitir que uma pessoa comum consiga acioná-lo com facilidade, pois a força e capacidade de transferência de energia desta são limitadas. Levando em conta este último fator, temos que analisar a questão do rendimento destes geradores também, pois a efetiva geração de energia elétrica torna-se cada vez menor à medida que o rendimento destes diminui.

2.2 POSSIBILIDADES DE GERADORES

2.2.1 Princípio de funcionamento das máquinas elétricas

De acordo com Kosow (1972, p. 04), até a descoberta de Faraday em 1831, o único modo de se gerar uma tensão era através de reações químicas em uma bateria ou pilha. A incrível descoberta deste cientista foi que o movimento relativo entre um campo magnético e um condutor elétrico também provoca a geração de uma tensão. A partir deste princípio foram criadas as máquinas elétricas.

As máquinas elétricas rotativas podem ser divididas em geradores e motores. Para Del Toro (1994, p. 107), quando a conversão de energia é feita da forma elétrica para a mecânica, o elemento é chamada de motor, e quando é feita da mecânica para a elétrica, é chamada de gerador. Além destas particularidades, quando estas são energizadas em corrente alternada, são ditas máquinas de corrente alternada ou máquinas ca, e quando energizadas em corrente contínua são ditas máquinas de corrente contínua ou máquinas cc.

Segundo Del Toro (1994, p. 107), os princípios fundamentais de funcionamento de máquinas ca e cc, assim como as leis fundamentais que as regem são os mesmos. Então, uma mesma máquina pode operar como motor ou gerador, ser de corrente contínua ou alternada. O que vai determinar se ela vai operar como motor ou gerador é como se dá a entrada e a saída de energia, e se vai operar em corrente contínua ou alternada, os detalhes construtivos destas.

Para o nosso tema de pesquisa, o que nos interessa são as máquinas elétricas operando como geradores, portanto, termos uma entrada de energia mecânica, e uma saída de energia elétrica.

Como já mencionado, os aspectos construtivos vão definir se estes vão ser de corrente contínua ou alternada. Precisamos então, fazer uma análise quanto aos tipos construtivos de geradores existentes ca e cc, e dentre as limitações impostas pela nossa situação problema, definir o que melhor se enquadre dentro destas.

2.2.2 Aspectos construtivos dos geradores elétricos

Existem duas características muito importantes presentes em todos os geradores a serem analisados, os enrolamentos de campo e os de armadura. Segundo Del Toro (1994, p. 115), os enrolamentos de campo são responsáveis por produzir a densidade de fluxo, e nos enrolamentos de armadura é onde a força eletromotriz ou f.e.m. é induzida.

Como demonstrado na Figura 6, Toda máquina elétrica possui uma parte fixa, chamada de estator, e uma parte rotativa, chamada de rotor. Dependendo do tipo de gerador analisado, os enrolamentos de campo podem estar localizados no estator e os de armadura no rotor, ou vice-versa.

O que vai determinar a alocação destes em um ou outro, é o tipo de aplicação, alguns fatores específicos como necessidade de um bom sistema de dissipação de calor dos enrolamentos, retificação, geração em corrente contínua, etc.

Como o foco deste trabalho está voltado para o rendimento e minimização das perdas de um sistema de geração própria de energia, não se pode utilizar qualquer gerador é preciso estudar e adaptar o mais adequado e com melhor rendimento.

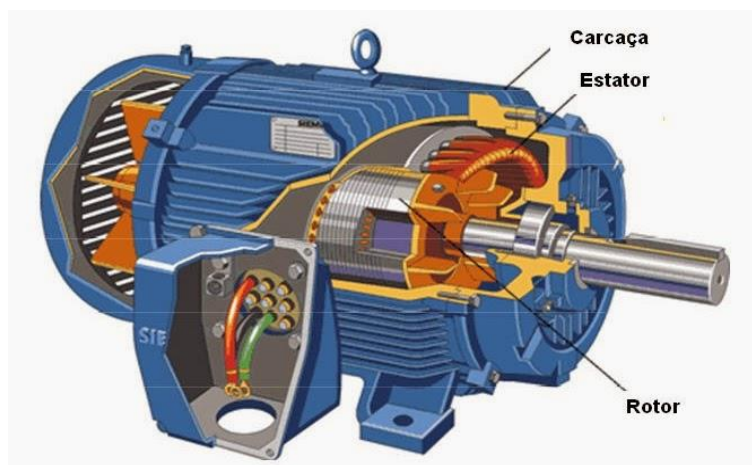


Figura 6 - Foto ilustrativa de máquina elétrica com rotor e estator.
Fonte: Adaptado de Máquinas Elétricas, LENZ (2014).

2.3 GERADORES DE CORRENTE ALTERNADA

2.3.1 Gerador síncrono

De acordo com Del Toro (1994, p. 197) “o gerador síncrono é usado universalmente pelas concessionárias de energia elétrica para fornecer potência trifásica ou monofásica aos seus consumidores”.

Os seus aspectos construtivos básicos estão descritos na Figura 6. Pode-se perceber por esta, que o enrolamento de campo está localizado no rotor, e o enrolamento de armadura no estator.

O enrolamento de campo é alimentado por uma fonte de alimentação contínua, fornecendo para este, portanto, uma corrente contínua. Como o rotor é uma peça rotativa, o meio encontrado para a injeção de corrente no mesmo, foi a fixação de escovas, como demonstrada na Figura 7, o que permite uma ligação elétrica entre o circuito externo e o rotor.

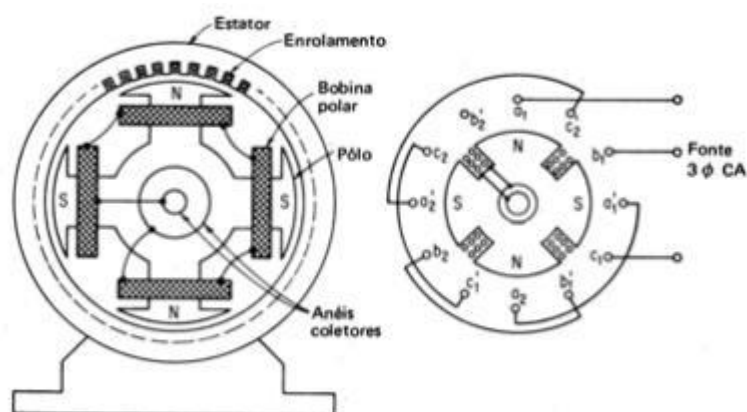


Figura 7 - Aspectos construtivos do gerador síncrono.
Fonte: Kosow (1982).

Quando o rotor é posto para girar por uma fonte primária de energia, como por exemplo, uma queda d'água, cria-se uma variação no fluxo magnético dos enrolamentos da armadura e conseqüentemente a geração de uma força eletromotriz na mesma.

De acordo com Maciel e Coraiola (2010, p.56), levando em consideração que temos uma bobina A-B movimentando-se com velocidade constante em torno de um campo magnético indutor de intensidade B , os valores instantâneos de f.e.m gerados, podem ser expressos pela Equação (1):

$$e = 2 \cdot 10^{-8} \cdot B \cdot l \cdot v \cdot \text{sen}\alpha \quad (1)$$

Onde,

- e = força eletromotriz gerada (Volts);
- B = campo magnético constante no tempo de indução (T);
- l = comprimento do condutor que corta as linhas de campo (m);
- v = velocidade linear do condutor (m/s);
- $\text{sen}\alpha$ = seno do ângulo entre a velocidade do condutor e as linhas de campo magnético.

Portanto, podemos perceber que se levarmos em consideração os valores instantâneos da f.e.m. gerada, a curva de representação destes valores é uma senóide. Temos, portanto, a geração de uma corrente alternada através deste gerador.

O termo síncrono surge do fato de que a velocidade do rotor é proporcional à frequência de sua corrente de armadura. Segundo Fitzgerald (2006, P. 239), o rotor gira em sincronismo ou com uma mesma velocidade do campo magnético girante produzido pelas correntes de armadura. A relação entre estas grandezas, pode ser verificado pela Equação (2).

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (2)$$

Onde,

- n_s = velocidade do campo girante ou velocidade síncrona (rpm);
- f = frequência da rede de alimentação (Hz);
- p = número de polos;

2.3.2 Análise quanto à utilização do gerador síncrono na bicicleta ergométrica

Levando em consideração o sistema proposto, pode-se utilizar este gerador em uma bicicleta ergométrica, mas com necessidade de uma fonte de tensão externa para alimentá-lo, o que foge do objetivo desta pesquisa que é a geração de energia elétrica de uma maneira independente, portanto, precisa-se recorrer a outro tipo de gerador.

2.3.3 Gerador síncrono de ímã permanente

De acordo com Fitzgerald (2006, p. 283), muito semelhante ao gerador síncrono convencional, o gerador síncrono de ímã permanente apresenta a diferença de não possuir enrolamentos de campo, sendo estes substituídos por ímãs permanentes de alto produto energético, que podem ser colocados tanto no rotor como no estator.

Por sua vez, se estes ímãs forem alocados no rotor, a corrente alternada será gerada diretamente nas bobinas do estator, dispensando assim a necessidade destas escovas. A Figura 8 mostra um diagrama esquemático deste tipo de gerador, em que os ímãs estão dispostos no rotor.

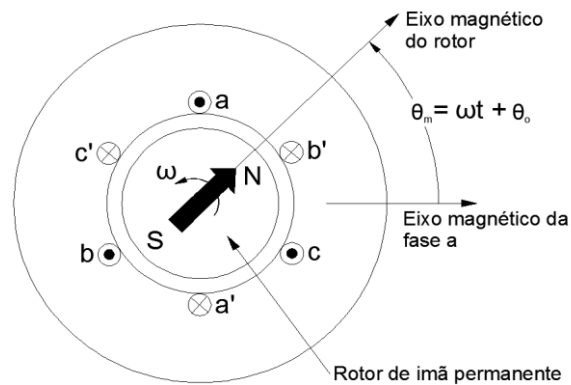


Figura 8 - Máquina de ímã permanente.
Fonte: Fitzgerald (2006).

Como se pode observar na Figura 8, temos no estator os enrolamentos de armadura, semelhante ao gerador síncrono convencional, e no rotor, a presença do ímã permanente.

A característica ou particularidade deste gerador que mais nos interessa, é exatamente o fato de possuir ímãs permanentes no rotor, eliminando assim a necessidade de uma alimentação externa contínua para o funcionamento deste. O princípio de funcionamento, assim como as leis fundamentais que o regem, são as mesmas dos geradores síncronos com enrolamentos de campo no rotor.

Ao se transferir uma energia mecânica ao gerador, colocando em rotação o rotor, haverá uma variação no fluxo magnético que corta as bobinas dos enrolamentos da armadura, localizadas no estator, que por fim irá gerar uma força eletromotriz nas bobinas do estator.

2.3.4 Análise quanto à utilização do gerador síncrono de ímã permanente na bicicleta ergométrica

Até aqui, o gerador síncrono de ímã permanente no rotor é o que melhor se enquadra no nosso problema. Podemos gerar energia elétrica mesmo que não tenhamos acesso a uma rede elétrica, pois não necessitamos de uma fonte de

energia elétrica externa para criar um campo magnético, já que o temos por meio do ímã permanente.

Outra característica importante deste gerador é que não há a necessidade das escovas para injeção de corrente no rotor. As escovas, além de necessitarem de uma manutenção constante, causam uma queda de tensão no circuito do rotor.

Basta apenas termos energia o suficiente para conseguir acionar este gerador para gerar energia elétrica.

2.3.5 Gerador assíncrono

O gerador assíncrono tem construção muito parecida com o gerador síncrono, já estudado na seção 2.3.1. A Figura 9 mostra um diagrama esquemático deste tipo de gerador.

Segundo Kosow (1982, p.43), o enrolamento da armadura do estator é idêntico ao do gerador síncrono, já o enrolamento do rotor, que produz corrente alternada induzida pelo enrolamento do estator, é formado por condutores de cobre ou alumínio engastados ou fundidos no rotor.

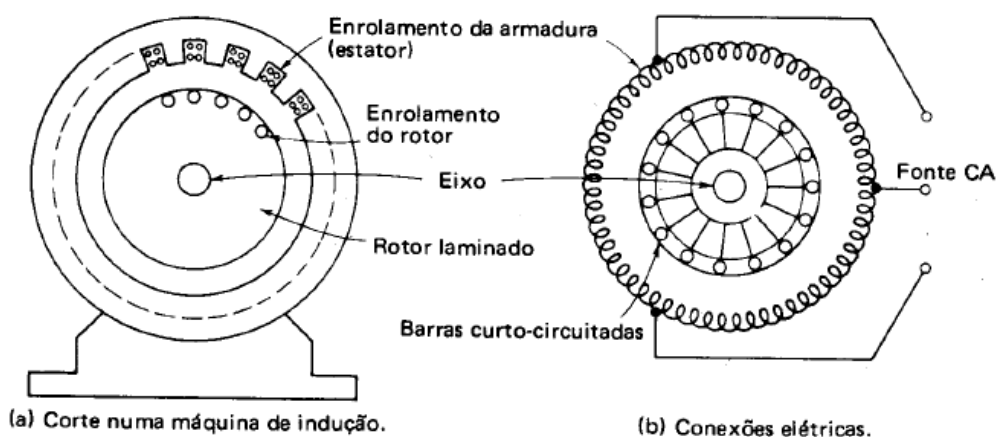


Figura 9 - Esquema do gerador assíncrono.
Fonte: Kosow, (1982).

Estes são curto-circuitados por anéis terminais em ambas as extremidades, no caso de um rotor gaiola de esquilo, ou entre eles mesmos, no caso de um rotor bobinado.

Uma característica importante desta máquina elétrica, é que tanto operando como motor ou gerador, o enrolamento de armadura precisa estar conectado a uma fonte de corrente alternada. Para Kosow (1982, p.43), o gerador é duplamente excitado, pois há fluxo de corrente alternada tanto no estator como no rotor.

Para funcionar como gerador, é necessário que se rotacione o rotor através de alguma força externa, em uma velocidade que exceda a velocidade síncrona. Este movimento irá produzir no rotor uma corrente induzida, que por sua vez dará origem a um campo magnético.

O campo no rotor fará com que surja uma tensão nas bobinas do estator, e caso a máquina esteja conectada a uma carga, fará com que uma corrente circule entre seus terminais. Gera-se, portanto, através de uma energia mecânica de uma fonte qualquer, energia elétrica.

2.3.6 Análise quanto à utilização do gerador assíncrono na bicicleta ergométrica

Analisando os aspectos construtivos e o princípio de funcionamento deste gerador, temos novamente o problema da necessidade de uma alimentação externa para o funcionamento deste. Como já mencionado, as bobinas do estator devem estar conectadas a rede elétrica para seu funcionamento, o que novamente vai contra nossa proposta experimental de um processo de geração independente.

2.4 GERADORES DE CORRENTE CONTÍNUA

Os aspectos construtivos e o princípio de funcionamento dos geradores de corrente contínua, são muito parecidos com os de corrente alternada já descritos,

com a diferença de que, como queremos uma corrente contínua nos geradores cc, temos associados a estes, comutadores ou ponte de diodos. De acordo com Fitzgerald (2006, p. 211), por mais que o objetivo seja a obtenção de uma tensão e corrente contínua na saída do gerador, uma tensão alternada sempre é produzida nas suas armaduras, causadas pelo movimento relativo entre o campo magnético do estator e o campo magnético do rotor.

Portanto, para termos uma tensão e corrente contínua através de qualquer gerador, necessitamos de um processo de retificação, que pode ser realizado por meio dos comutadores ou de ponte de diodos.

Analogamente aos geradores já descritos, uma energia mecânica é transferida ao eixo do rotor, colocando-o em rotação, levando ao surgimento de uma tensão e corrente alternada nas bobinas da armadura, que são retificadas e disponibilizadas para as cargas ligadas ao sistema.

2.4.1 Análise quanto à utilização do gerador de corrente contínua na bicicleta ergométrica

A potência envolvida no nosso sistema de geração é muito baixa. Portanto, o rendimento é um parâmetro decisivo na hora de se escolher o gerador a ser utilizado. Nos geradores de corrente contínua, obrigatoriamente temos que ter os processos de retificação, que sempre envolvem algum tipo de perda de energia, seja por atrito ou efeito joule.

Como nosso objetivo é minimizar as perdas de energia, para no final termos um rendimento melhor no processo de geração, não é aconselhável optar por este tipo de gerador. O motor de corrente contínua sem escovas seria uma ótima opção levando em consideração estas perdas, mas, isso não implica em sua utilização no nosso experimento.

Temos que levar em consideração a questão da disponibilidade e as máquinas elétricas que temos disponíveis, para não tornar inviável a concretização deste experimento em termos financeiros.

Com exceção do motor de corrente contínua sem escovas, que não necessita de uma fonte de alimentação externa para sua operação, tem-se que levar em consideração a necessidade de uma fonte de alimentação externa para o funcionamento dos geradores de corrente contínua, o que elimina de vez a opção de utilizá-los em nosso experimento.

2.4.2 Conclusões quanto ao gerador a ser utilizado

Utilizando-se um gerador de corrente alternada faz-se necessário o uso de uma ponte de diodos com a finalidade de retificação da onda produzida na saída do gerador. A ponte produzirá perdas de energia elétrica em seu interior, essas perdas são mínimas, porém, não desprezíveis porque a energia gerada será pequena.

No gerador de corrente alternada o aproveitamento geral é bem melhor, podendo gerar em três fases, suavizando a crista da onda, além de trabalhar com maior eficiência em diferentes rotações. Esse tipo de gerador trabalha com escovas de anéis lisos, implicando assim em uma manutenção para troca das mesmas, porém com menor frequência que em um gerador cc.

Com a utilização do gerador cc, a ponte retificadora não se faz necessária, visto que o comutador da máquina realiza essa função. A saída é uma onda de corrente pulsante, que pode ser bem suavizada pela combinação de vários conjuntos de bobinas. O comutador de escovas produz perdas por atrito e efeito joule, implicando também em uma manutenção periódica para revisão e troca de escovas, o que não torna atrativo ao trabalho.

Observa-se que nos dois casos mencionados anteriormente é possível a existência de duas formas construtivas em relação ao campo magnético, que podem ser: a utilização de ímãs permanentes e a excitação com bobina de campo. Neste último caso, faz-se necessário a utilização de uma fonte externa para alimentação.

Para o caso do gerador com ímã permanente, que seria a melhor opção para ser utilizada em nosso experimento por não necessitar de uma fonte de alimentação externa, esta máquina pode apresentar os seguintes aspectos quanto à localização do campo: ímã no rotor ou no estator.

Quando o ímã está presente no rotor não se observa a ocorrência de escovas, a tensão gerada surge no estator em forma de corrente alternada podendo ser retificada por diodos. Se o ímã estiver presente no estator, pode-se obter corrente contínua com o uso de comutador ou corrente alternada com o uso de coletor de escovas. (BATISTA e BRABILLA, 2010).

A Tabela 2 demonstra a comparação dos geradores cc e ca:

Tabela 2 - Comparação entre máquinas

GERADOR CA	GERADOR CC
Aplicação em carga	Necessita de inversor
Necessita de sincronismo	Velocidade variável
Operação contínua	Perdas no comutador
Dificuldade de Armazenamento	Facilidade de armazenamento
Necessita retificação	Já retificado
Menor taxa de manutenção	Maior taxa de manutenção

Fonte: Adaptado de Batista e Brabilla (2010).

Após todas estas considerações, vemos que o gerador CA com ímã no rotor se mostra mais útil à realização deste trabalho. Levando em consideração também o tamanho do gerador, que para efeitos práticos, quanto maior as suas dimensões, maior terá que ser a força para seu acionamento, esta máquina é de fácil acionamento, e apresenta a vantagem de não necessitar nem de uma fonte de alimentação externa para seu funcionamento, e nem das escovas coletoras para injeção de corrente no rotor, sendo, dentre as analisadas, a que melhor se adequa ao nosso estudo.

O fato de já termos disponível este gerador, torna ainda mais viável sua utilização em nosso experimento.

2.4.3 Rendimento no processo de geração de energia

Nosso objetivo é encontrar o rendimento no processo de geração de energia elétrica através deste módulo experimental, e como atividade secundária, possibilitar a utilização desta energia. A fórmula básica para se calcular o rendimento deste processo é dada pela Equação (3).

$$\eta = \frac{P_e}{P_p} \quad (3)$$

Onde,

- η = Rendimento;
- P_e = Potência elétrica gerada (W);
- P_p = Potência desenvolvida pela pessoa (W);

Analisando esta fórmula, para calcular o rendimento precisamos de duas grandezas: a potência desenvolvida pela pessoa (P_p) e a potência elétrica gerada (P_e).

Sabemos que,

$$P = U \cdot I \quad (4)$$

Na Equação (4), U é a tensão medida nos terminais do gerador em volts (V), e I é a corrente elétrica gerada pelo mesmo em Amperes (A). Estas duas grandezas podem ser medidas facilmente através de um multímetro, regulado para medir valores de tensão e corrente. Portanto, torna-se extremamente simples obter-se a potência elétrica gerada. Mas, como medir a energia que a pessoa está transferindo ao gerador neste processo? Não existe um aparelho que nos forneça tal grandeza, portanto, teremos que recorrer a outros recursos para a obtermos.

Sabemos que:

$$P = C_m \cdot \omega \quad (5)$$

Na Equação (5) C_m é o conjugado mecânico aplicado ao eixo do gerador, medido em Newtons metro (N.m), (P) é a potência desenvolvida também no eixo do gerador em (w), e (ω) é a velocidade angular em radianos por segundo.

Mas,

$$C_m = F \cdot d \cdot \text{sen}\theta \quad (6)$$

Na Equação (6), (d) é o braço de alavanca entre a força que a pessoa aplica ao pedal e o eixo de giro do mesmo, (F) é a força aplicada ao pedal sendo medida em Newtons e (θ) é o ângulo entre a força aplicada e a normal da alavanca.

Substituindo a Equação (6), na Equação (5), temos:

$$P = F \cdot d \cdot \omega \cdot \text{sen}\theta \quad (7)$$

Das equações da cinemática, sabemos que:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (8)$$

em que (f) é a frequência de rotação do eixo do gerador, sendo esta medida em Hertz (Hz).

Substituindo a Equação (8) na Equação (7), temos:

$$P = 2 \cdot F \cdot d \cdot \pi \cdot f \cdot \text{sen}\theta \quad (9)$$

Através da Equação (9), chegamos à relação que queríamos. Através dela, podemos determinar a potência desenvolvida pela pessoa (P_p) que é transferida ao

eixo do pedal, e conseqüentemente ao gerador. Para determinarmos seu valor, temos que medir três grandezas, (F), (d) e (f).

Para encontramos (d), basta medirmos o mesmo com uma régua ou trena. Falta-nos agora, encontrar uma maneira de se determinar os valores da força que a pessoa aplica ao pedal (F), assim da frequência de rotação deste gerador, e do ângulo entre a força e a normal a alavanca.

A maneira mais prática de se determinar o valor da força (F) é através das células de carga. Estas possuem um conversor analógico que pode ser conectada a um computador, para leitura e análise dos valores coletados. Através do software LabVIEW, os dados coletados serão registrados e analisados em tempo real, isto é, ao mesmo tempo em que se procede à atividade física.

Com estas adaptações, e através das células de carga, conseguiremos medir a potência transferida pela pessoa ao gerador. Com o objetivo de manter a tensão na saída da carga a um nível constante, iremos conectar a este um variador de tensão trifásico conectado a um retificador CA/CC.

2.5 CÉLULA DE CARGA

Uma célula de carga é um aparelho eletrônico utilizado para converter força em sinal elétrico. Ela tem a capacidade de medir a deformação de um corpo, transformando essa deformação em um sinal de tensão, que é da ordem de mili/microvolts e diretamente proporcional a variação da carga mecânica que o corpo é submetido. A célula é composta por pelo menos um extensômetro e um circuito de ponte de Wheatstone.

O tipo de aplicação da célula de carga é o que determina a quantidade de extensômetro e a configuração do circuito ponte.

Devido a sua boa resolução, os circuitos tipo ponte são amplamente utilizados para medir pequenas variações de resistência, sendo mais precisos que um ohmímetro comum. A configuração mais utilizada é a ponte de Wheatstone, pois depende somente de resistores padrões e elimina as interferências externas.

Segundo Sadiku e Alexander, 2013, o circuito ponte foi inventado por Charles Wheatstone, levando assim seu nome. O circuito consiste em dois ramos de resistores com dois resistores cada, conforme mostra a Figura 10.

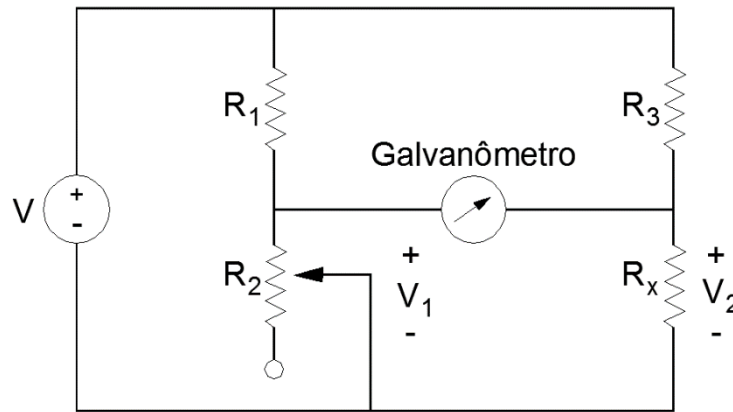


Figura 10 - Ponte de Wheatstone.
Fonte: Adaptado de Sadiku (2013).

Quando a tensão entre o galvanômetro for nula, dizemos que a ponte está balanceada, neste momento as resistências obedecem a relação:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_x} \quad (10)$$

Para medição de uma resistência, precisamos conhecer o valor das outras três resistências, levar a ponte a condição de balanceamento e, através da relação acima, calcularmos o valor dessa resistência.

2.6 AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Os amplificadores operacionais (AmpOP), são blocos essenciais que precisam estar presentes em muitos circuitos analógicos, e sua função principal é amplificar a diferença de dois sinais de entrada. Possuem como características alto

ganho, alta impedância de entrada e baixa impedância de saída, (BRUNO TRANQUILLINE, 2008).

O AmpOP é um dispositivo composto por duas entradas, a entrada inversora (-) que inverte o sinal de saída e a entrada não inversora (+) que mantém o sinal de saída, uma saída do sinal amplificado e a alimentação em +/- V_{cc} do circuito integrado interno.

Este amplificador se faz necessário ao sistema apresentado no presente trabalho devido as células de carga terem a capacidade máxima de fornecimento de tensão na ordem de mili volts, o que torna a leitura deste dado impossível para os equipamentos disponíveis.

Para que a amplificação seja viável, inclusive para sinais de baixa amplitude como, por exemplo, sinais de transdutores, é necessário que o amplificador possua um alto ganho de tensão.

As Figuras 11 e 12 mostram a simbologia de um AmpOP e seus dispositivos.

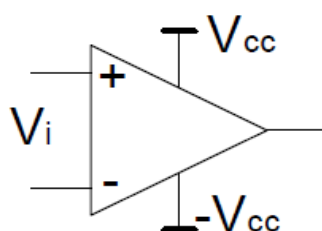


Figura 11 - Esquema representativo de um AmpOP.
Fonte: Adaptado de Unipampa (2009).

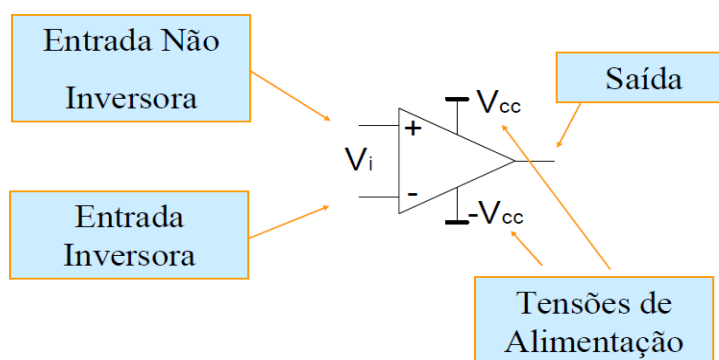


Figura 12 – Explicação dos dispositivos que compõe um AmpOP.
Fonte: Adaptado de Unipampa (2009).

Nessa configuração o AmpOP é utilizado sem nenhum componente externo, ou seja, a saída tende a saturar em valores inferiores a V_{cc} aplicada. A Figura 13 mostra o Circuito Integrado (LM 741), que funciona como amplificador operacional.

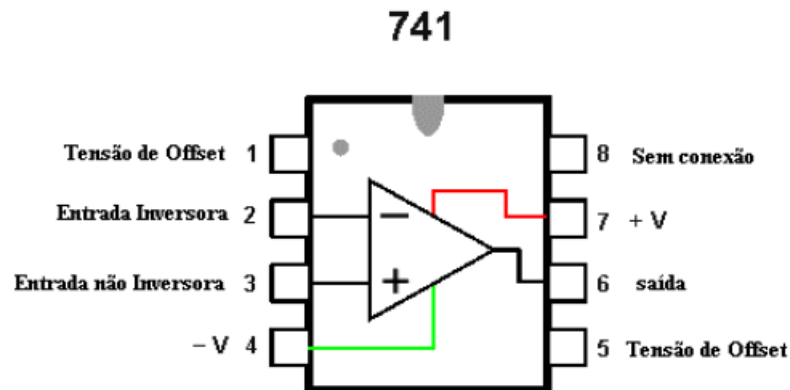


Figura 13 - Pinagem do CI LM 741.
Fonte: Adaptado de Unipampa (2009).

O circuito amplificador não-inversor não apresenta defasagem do sinal de saída, portanto o sinal de saída não é invertido em relação ao sinal de entrada, cabe então dimensionar as resistências para obter o ganho necessário ao sistema.

Conforme Barbi (2006), a Equação (11) para o AmpOP não inversor é definida como:

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) * V_i \quad (11)$$

$$G = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (12)$$

Onde,

- V_o = Sinal de saída amplificado (V);
- V_i = Sinal de entrada (mV);
- G = ganho (V_o / V_i) adimensional;
- R_1 = Resistência elétrica 1 (Ω);
- R_2 = Resistência elétrica 2 (Ω);

Com isso pode-se definir o ganho de tensão desejado pelo dimensionamento correto dos resistores associados ao amplificador.

2.7 TRANSDUTORES DE CORRENTE E TENSÃO

Transdutor é um dispositivo que converte uma forma de energia em outra forma de energia. Na maioria dos casos, consiste em converter um deslocamento mecânico ou converter alguma grandeza física em um sinal de energia. Com o recurso dos transdutores podemos utilizar instrumentação eletrônica para medir, modificar e melhorar aplicações industriais.

Por exemplo, hoje em dia existem já transdutores integrados de temperatura com sensibilidades da ordem dos 10 a 200 mV por grau centígrado, extremamente lineares, (ALMEIDA, 2004).

Os transdutores de tensão e corrente são amplamente aplicados em circuito eletrônicos para manter o nível de sinal de tensão adequado para sua leitura de softwares específicos. Pensando em uma equivalência, eles funcionariam como os TC's e TP's utilizados para leitura de medição de energia. A Figura 14 ilustra exemplo de transdutores de corrente e tensão.

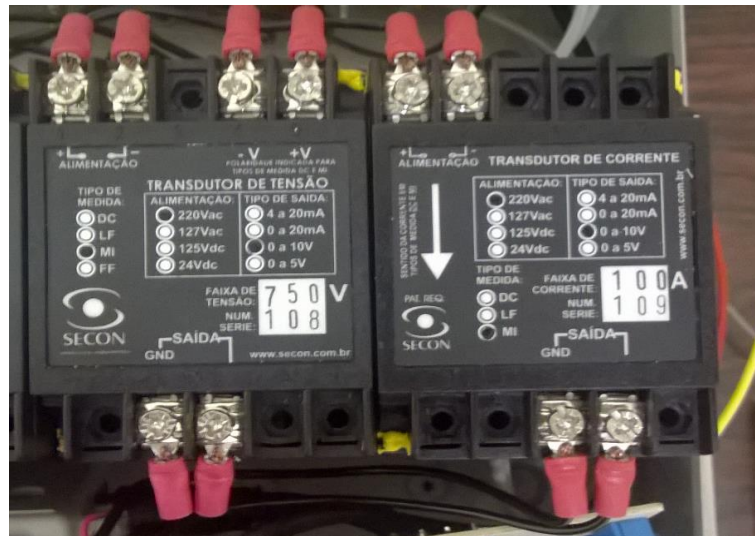


Figura 14 - Transdutores de corrente e tensão
Fonte: Própria.

2.8 SOFTWARE LABVIEW

O LabVIEW (acrónimo para Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) é uma linguagem de programação gráfica originária da National Instruments. A primeira versão surgiu em 1986 para o Macintosh e atualmente existem também ambientes de desenvolvimento integrados para os Sistemas Operativos Windows, Linux e Solaris.

Os principais campos de aplicação do LabVIEW são a realização de medições e a automação. A programação é feita de acordo com o modelo de fluxo de dados, o que oferece a esta linguagem vantagens para a aquisição de dados e para a sua manipulação. São compostos pelo painel frontal, que contém a interface, e pelo diagrama de blocos, que contém o código gráfico do programa. O programa não é processado por um interpretador, mas sim compilado (NATIONAL INSTRUMENTS, 2016).

Este software tem a possibilidade de aquisição de dados emitidos por um sistema, através de cabos de sinal, e o trato destes dados graficamente. Os dados só podem ser coletados dentro de uma faixa de sinal de tensão entre 0 a 5 V.

A Figura 15 ilustra a tela de aquisição de dados do software LabVIEW.

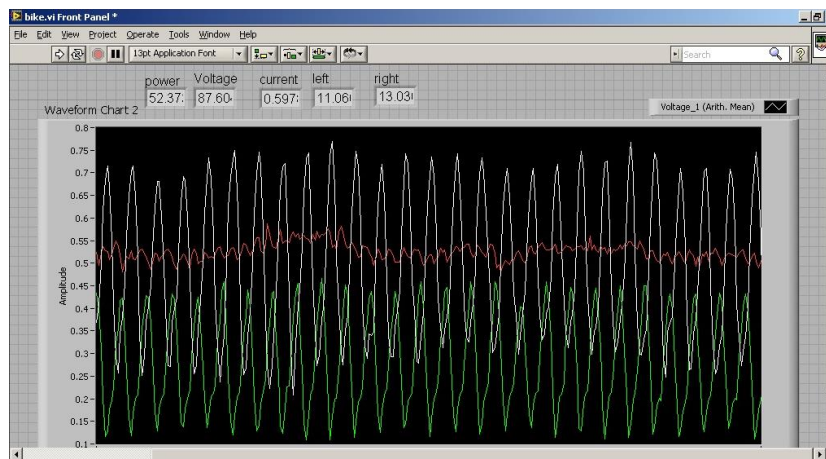


Figura 15 - Tela de aquisição de dados LabVIEW
Fonte: Própria.

2.9 RETIFICADOR

Os retificadores podem ser classificados segundo a sua capacidade de ajustar, ou não, o valor da tensão/corrente de saída (controlados x não controlados); de acordo com o número de fases da tensão alternada de entrada (monofásico, trifásico, hexafásico, etc.), ou ainda em função do tipo de conexão dos elementos retificadores (meia ponte x ponte completa).

Os retificadores não-controlados são aqueles que utilizam diodos como elementos de retificação, enquanto os controlados utilizam tiristores ou transistores. Usualmente topologias em meia onda não são aplicadas. A principal razão é que, nesta conexão, a corrente média da entrada apresenta um nível médio diferente de zero.

Tal nível contínuo pode levar elementos magnéticos presentes no sistema (indutores e transformadores) à saturação, o que é prejudicial ao sistema, ou ainda a uma subutilização do material ferromagnético do núcleo. Topologias em ponte completa absorvem uma corrente média nula da rede, não afetando, assim, tais elementos magnéticos (POMILIO, 2014).

Para Barbi (2006, p.7), os retificadores podem ser monofásicos ou trifásicos, de meia onda, onda completa com ponto médio, onda completa em ponte, retificados a diodo ou a tiristor, e também podem ter associados ao seu circuito um

filtro capacitivo. As Figuras 16 e 17 ilustram alguns retificadores mencionados com seus circuitos e formas de ondas resultantes.

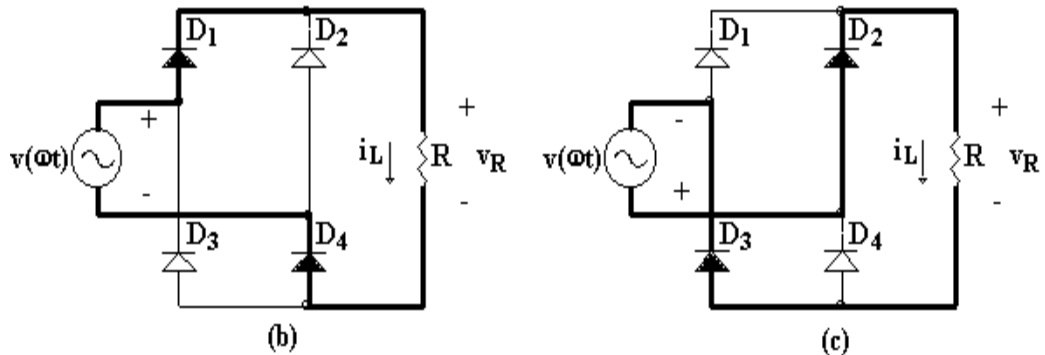


Figura 16 - Circuito retificador monofásico onda completa
Fonte: Canesin (1991).

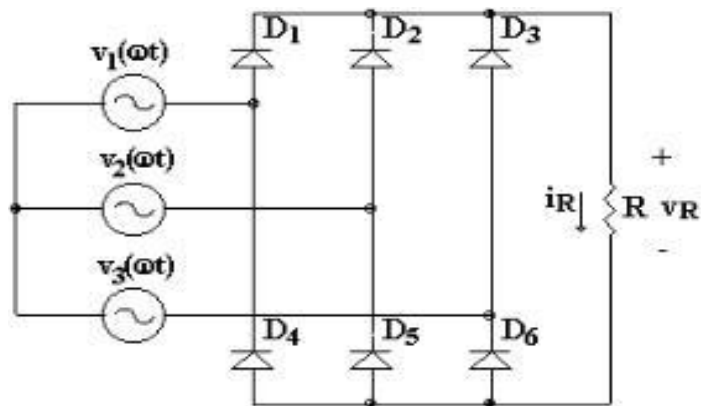


Figura 17 - Circuito retificador trifásico onda completa.
Fonte: Canesin (1991).

Como mencionado, estes retificadores podem ser monofásicos ou trifásicos, e o que vai determinar a utilização de um ou outro, é a topologia do circuito e do sistema. Na Figura 17 temos uma ilustração do retificador trifásico de onda completa (Ponte de Graetz).

A ponte de Graetz é uma das estruturas mais empregadas industrialmente e como iremos alimentar uma carga resistiva, torna-se uma alternativa viável a ser utilizada em nosso sistema. (IVO BARBI, 2006).

De acordo com Barbi (2006) as equações da tensão e corrente média na carga para este retificador, são:

$$V_{lméd} = 2,34 \cdot V_R \quad (14)$$

$$I_{lméd} = I_{dméd} \cdot 3 \quad (15)$$

Onde,

- $V_{lméd}$ = tensão média na carga (V);
- V_R ou V_0 = tensão eficaz (V);
- $I_{lméd}$ = corrente média drenada pela carga (A);
- $I_{dméd}$ = corrente média em cada diodo (A);

Portanto, do ponto de vista experimental, o retificador se conectará à lâmpada, com a função de realizar uma retificação na tensão e corrente elétrica gerada, e transmitirá uma tensão e corrente média conforme as Equações (14) e (15).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA

O sistema compõe-se de um protótipo de bicicleta ergométrica em estrutura metálica, onde se tem um pedal e uma polia interligados, e um gerador acoplado no volante de inércia da polia maior, conforme Figura 18.

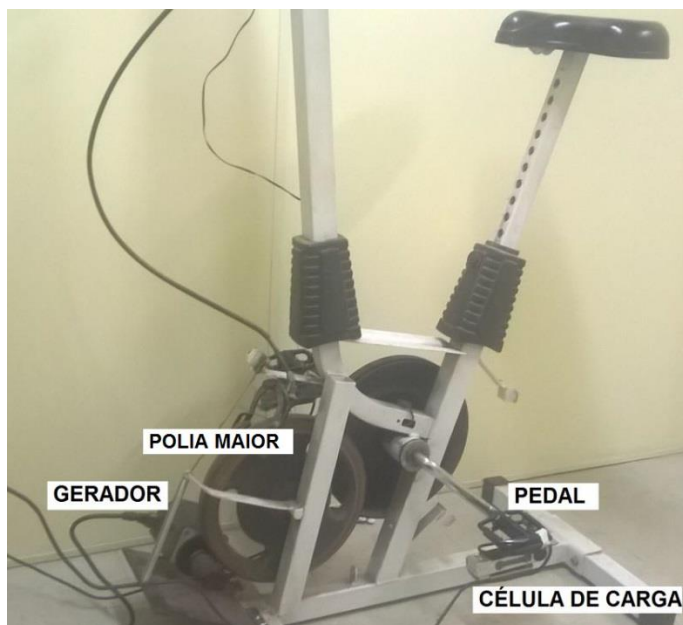


Figura 18 - Sistema bicicleta ergométrica
Fonte: Própria.

Para que o sistema de coleta de dados seja efetivo, será instalada uma célula de carga na bicicleta ergométrica, com o objetivo de levantar os valores das cargas mecânicas aplicadas ao pedal. Estes valores serão coletados e repassados a um sistema de processamento de dados em um computador, o LabVIEW, por meio de um dispositivo chamado de Datalogger. Com isto, teremos registrados os valores da força aplicada pela pessoa aos pedais instante a instante, e, com esta, determinaremos a energia transferida pela pessoa à bicicleta.

O ato de se pedalar irá gerar energia elétrica por intermédio do gerador. Iremos monitorar os valores de tensão e corrente gerados neste gerador, conectando sua saída ao conversor A/D, que irá repassar os dados obtidos para o LabVIEW.

Na linha de programação faremos com que o sinal de tensão obtido seja multiplicado pelo sinal de corrente, para obter assim a potência elétrica desenvolvida, pois, como já demonstrado pela Equação (4), quando multiplicamos a tensão elétrica de um elemento pela corrente elétrica que passa por ele, temos a potência elétrica gerada.

Tendo a potência mecânica desenvolvida pela pessoa e a potência elétrica do gerador, determinaremos o rendimento deste processo.

A fim de dar uma aplicação para a energia elétrica gerada, iremos alimentar com esta energia uma lâmpada incandescente, e como o gerador é trifásico e a carga monofásica iremos retificar esta corrente elétrica através de um retificador trifásico.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS E PROCEDIMENTOS DE MONTAGEM

Após o desenvolvimento teórico sobre cada componente do módulo experimental a ser utilizado neste trabalho, iremos agora detalhar quais componentes foram escolhidos e suas especificações.

A Figura 19 mostra basicamente o esquema do sistema de estudo proposto, com os componentes a serem utilizados, enquanto que a Figura 20 representa o circuito elétrico equivalente ao sistema de estudo.

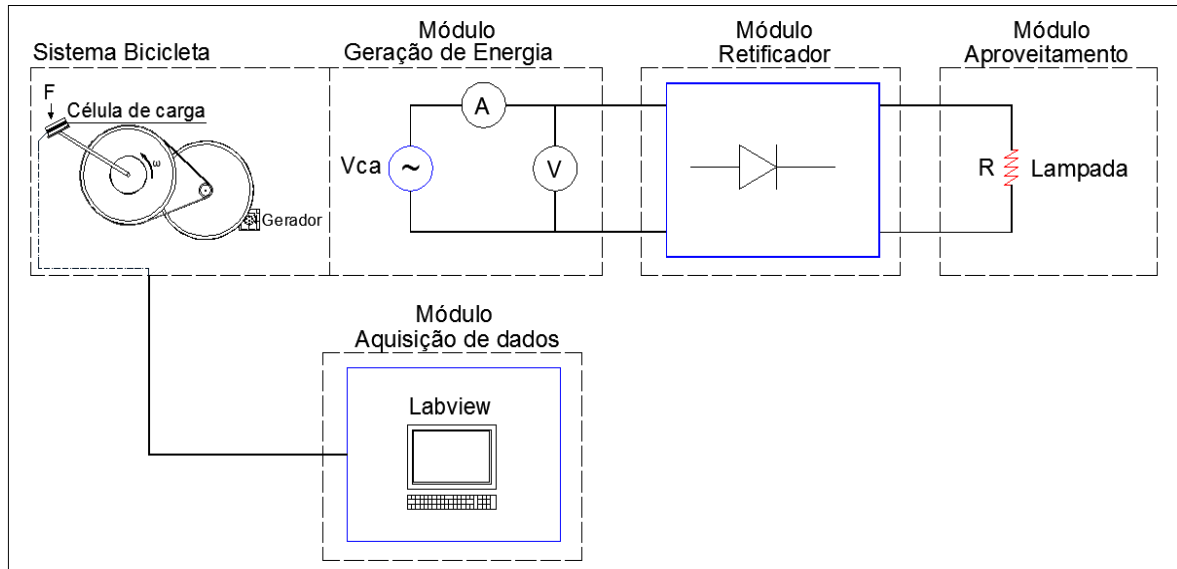


Figura 19 – Esquema básico de estudo
Fonte: Própria.

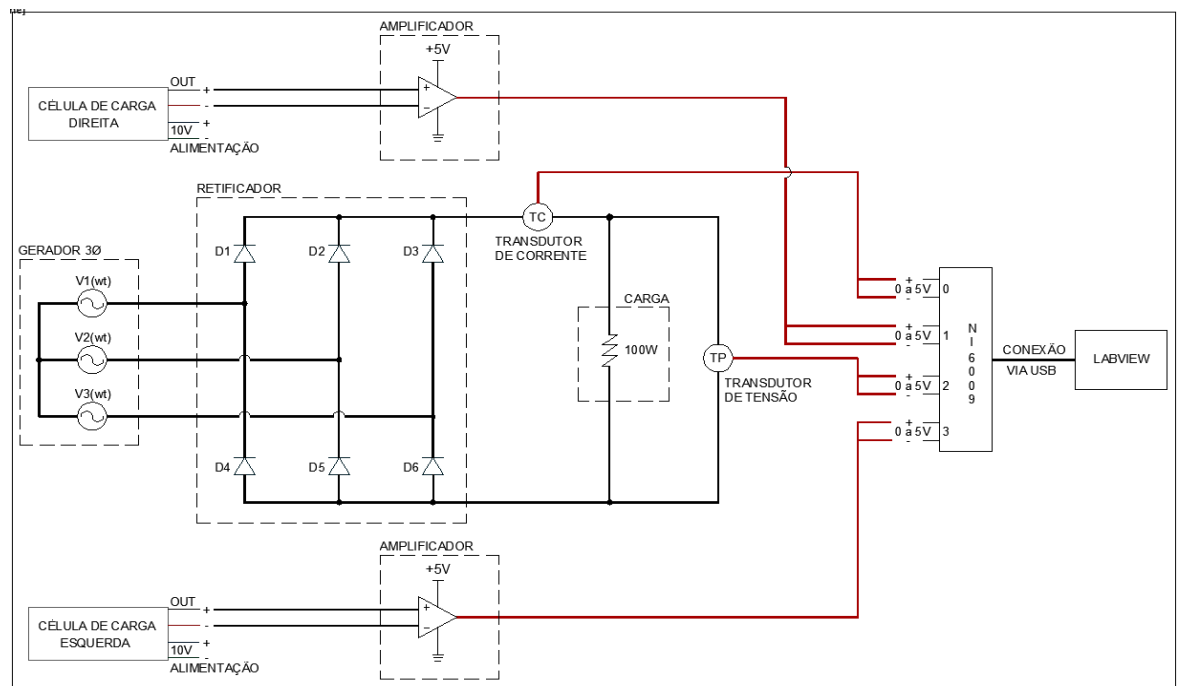


Figura 20 - Circuito elétrico equivalente e de coleta de dados do sistema proposto.
Fonte: Própria.

Na sequencia estão descritos os componentes presentes e suas respectivas funções dentro do sistema.

- Bicicleta ergométrica: elemento que possibilitará a troca de energia entre a pessoa e o gerador;
- Gerador: máquina elétrica responsável pela geração de energia elétrica através do giro dos pedais;
- Retificador: circuito elétrico que irá transformar a corrente e tensão alternadas em contínua para aplicação na carga e leitura no LabVIEW;
- Resistor: elemento responsável por transformar a energia elétrica gerada em calor, utilizado uma lâmpada incandescente de 100W;
- Células de carga: têm a função de monitorar a cada instante a força aplicada pela pessoa aos pedais através de circuito no interior da célula de carga;
- AmpOP: circuito elétrico responsável por amplificar o sinal de saída da célula de carga para leitura do software LabVIEW;
- Transdutores de tensão e de corrente: responsáveis por abaixar a tensão e a corrente geradas para níveis legíveis no LabVIEW;
- Multímetro: Instrumentos de medição de corrente e tensão;
- Datalogger: Responsável pela interface entre os dados coletados e o LabVIEW.
- LabVIEW: Responsável pela geração de gráficos e planilha excel dos dados coletado do sistema e análise de rendimento e eficiência;

Iremos detalhar agora, quais os componentes utilizados bem como suas especificações técnicas.

3.2.1 Bicicleta Ergométrica

A bicicleta ergométrica utilizada já se encontrava adaptada à prática experimental, e nos foi cedida pelo professor orientador. A mesma pode ser vista através da Figura 21.

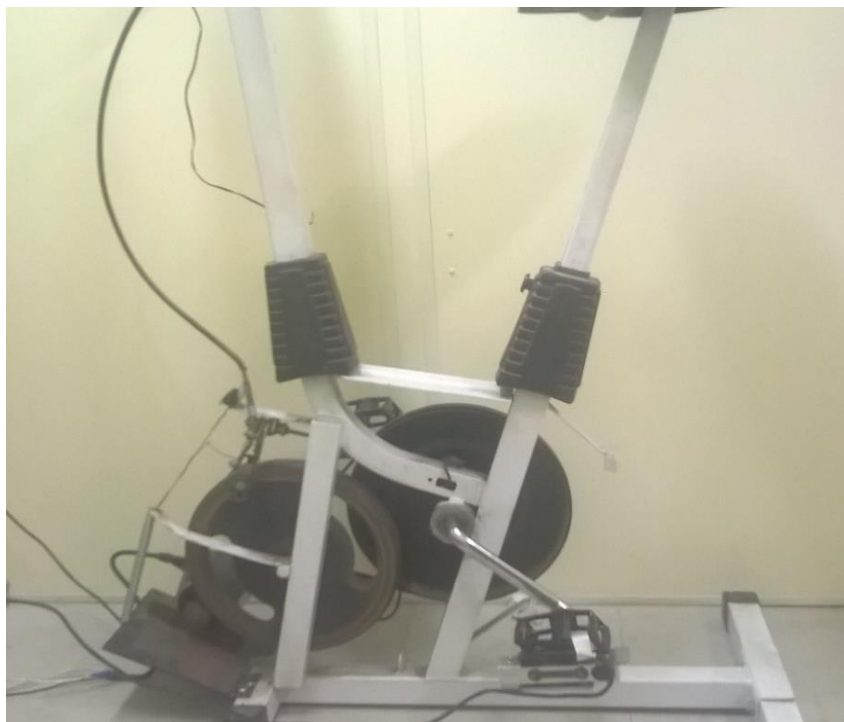


Figura 21 - Foto do protótipo bicicleta ergométrica.
Fonte: Própria.

Trata-se de uma bicicleta ergométrica comum, mas sem os dispositivos eletrônicos de controle de velocidade, carga, etc.

Basicamente ela é composta de um quadro em ferro fundido, um banco, um apoio para os braços, dois pedais ligados a uma polia, uma segunda polia com volante de inércia que será responsável por acionar o gerador, e uma correia de transmissão responsável por interconectar e transmitir o movimento entre estas duas polias.

No quadro foi adaptado um suporte e uma base em ferro para fixação do gerador, e uma mola para garantir a encosto entre o eixo do gerador e a segunda polia com o volante de inercia.

A Figura 22 traz a especificação de cada elemento pertencente a bicicleta.



Figura 22 - Bicicleta Ergométrica.
Fonte: Própria

3.2.2 Célula de Carga

Após uma pesquisa em vários fornecedores, escolhemos as células de carga PLA 5/30kg da Líder Balanças, que foram as que mais se adequaram aos parâmetros impostos pela nossa situação problema.

Sua capacidade máxima de carga é de até 30kg, e o fato de a termos escolhido com esta especificação se deve ao seu valor de mercado, que é cerca de oito vezes menor que o da próxima célula de carga disponível, a PL 50/150kg.

Considerando que temos que comprar duas destas, este trabalho se tornaria inviável do ponto de vista financeiro, e, analisando a situação problema, uma pessoa

aplicando uma força aos pedais por meio dos pés, concluímos que este limite de carga está bem dimensionado a força a ser aplicada.

A Figura 23 traz uma ilustração da célula de carga utilizada já adaptada ao pedal da bicicleta.



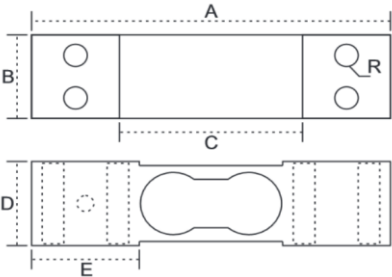
Figura 23 - Célula de carga Líder.
Fonte: Própria.

De acordo com a Tabela 3, a sensibilidade da célula de carga é de 2mV/V, isso significa que o sinal de saída varia proporcionalmente com a força aplicada na célula de carga de acordo com a tensão que alimenta.

Ou seja, se alimentarmos a célula com 10 volts, teremos um sinal na saída de 0 a 20 mV, onde para cada 2mV na saída significa que houve um aumento de força aplicada a célula de 1,5kg.

Assim com esta relação conseguimos ter a equivalência de força aplicada pelo sinal de saída gerado.

Tabela 3 - Especificação técnica da célula de carga

	MODELO PLA	Med.	A	B	C	D	E	R
	5, 10, 15, 20 e 30 Kg	mm	130	30	106	15	24	M8x1
Sensibilidade da célula de carga em mV/V	2mV/V +/-0,1%							
Creep à carga total aplicada	20 min. < 0,03, 6hs < 0,05							
Zero inicial saída nominal	+/- 1%							
Temperatura de teste em °C	-10 a + 50 graus							
Temperatura compensada em °C	-10 a + 50							
Efeito de temperatura	Compensada							
Sobrecarga sem danos, capacidade nominal	150%							
Sobrecarga de ruptura	300% da capacidade							
Deflexão máxima mm a capacidade nominal	< 1.0 mm							
Excitação VDC ou VCA	Max. 15, recomendada 10							
Impedancia de saída ohm	350 +/- 1							
Impedancia de entrada ohm	400 +/- 15							
Resistencia de isolamento	> 5000 megaOhms							
Material da célula de carga	Aço							
Grau de proteção	IP67							
Máxima dimensão da plataforma	300x300 mm							

Fonte: Adaptado de Líder Balanças (Catálogo, 2015).

O fabricante recomenda a fixação desta célula de carga conforme ilustra a Figura 22.

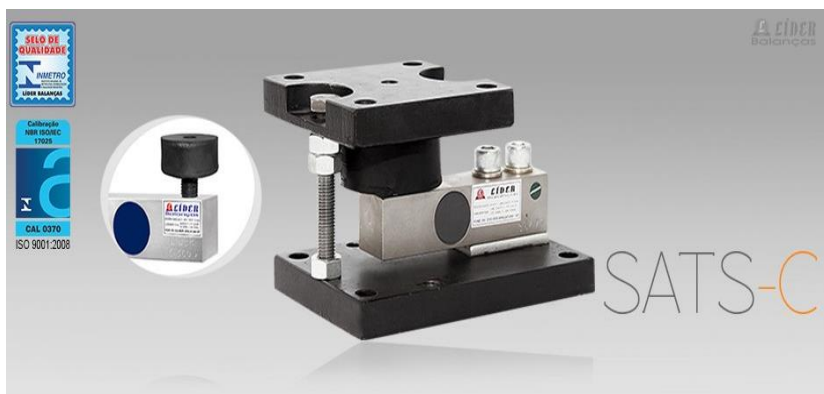


Figura 24 - Modo de fixação da célula de carga
Fonte: Retirado de Líder Balanças, (Catálogo, 2015).

Para seguirmos as recomendações do fabricante quanto a esta fixação, primeiramente tivemos que substituir os pedais de plástico por pedais de alumínio, para podermos assim, fixar uma placa de ferro a estes. A Figura 25 ilustra adaptações e como ficou o conjunto após a fixação da célula ao pedal.



Figura 25 - Fixação da célula de carga no pedal
Fonte: Própria.

Os fios de saída das células de carga tiveram que ser fixados de uma maneira que fosse possível o movimento de rotação, sem que estes se enrolassem ou viessem a se prender nos pedais. A solução encontrada foi dar liberdade para o movimento de rotação, deixando a saída dos cabos para a parte de fora dos pedais, com um comprimento de cabo suficiente para se realizar o movimento.

Outra parte da fixação foi fixada nos próprios pedais, por meio de abraçadeira e fita adesiva, e dos pedais deixamos o comprimento de cabo disponível para ser conectado ao computador. A Figura 26 ilustra como foram feitas estas adaptações.



Figura 26 - Fixação dos cabos de saída das células de carga.
Fonte: Própria.

3.2.3 Amplificador Operacional

O sinal gerado na célula de carga possui uma amplitude bem pequena, o que impossibilita sua leitura, seja no LabVIEW ou até mesmo em um osciloscópio, como percebemos ao tentar visualizar o sinal gerado em um osciloscópio fornecido pela universidade. Isso gerou a necessidade de utilizar um amplificador operacional para aumentar a amplitude do sinal gerado pela célula de carga.

O sinal gerado por esta é da ordem de 2mV/V , ou seja, para cada 1V aplicado na alimentação da célula, tem-se 2mV na saída desta, sinal este que é proporcional a carga mecânica aplicada sobre ela. Utilizaremos uma alimentação de 10V para a célula de carga, o que gera um sinal na saída de 0 a 20 mV .

A faixa de leitura do LabVIEW é de 0 a 5 V , e para obter os dados dentro destes limites, definiu-se um amplificador operacional com um ganho de 200 vezes, o que fará com que os valores dos sinais de saída da célula de carga fiquem multiplicados por este valor, e assim, se enquadrem dentro da sensibilidade do software. Por exemplo, se uma força aplicada a célula de carga gerar um sinal de 20mV , com o amplificador, este sinal terá uma amplitude de 4V .

Será utilizada a entrada não inversora (+) para que o sinal de saída tenha o mesmo sentido do sinal de entrada, a entrada (-) será aterrada, e a fonte V_{cc} será fixada em 5V .

A fim de amplificar o sinal de saída das duas células de carga, precisaremos utilizar dois amplificadores operacionais. Para esta montagem foram utilizados os seguintes elementos:

- 2 resistores de 4k Ω ;
- 2 resistores de 800k Ω ;
- 2 Circuitos Integrados LM 741;
- 1 Placas de circuito perfurada;

A Figura 27 mostra como ficaram os circuitos amplificadores. Para evitar que o circuito seja danificado por contato com outras partes do nosso sistema, estes foram acomodados na caixa de aquisição de dados, como pode ser visto na Figura 28.

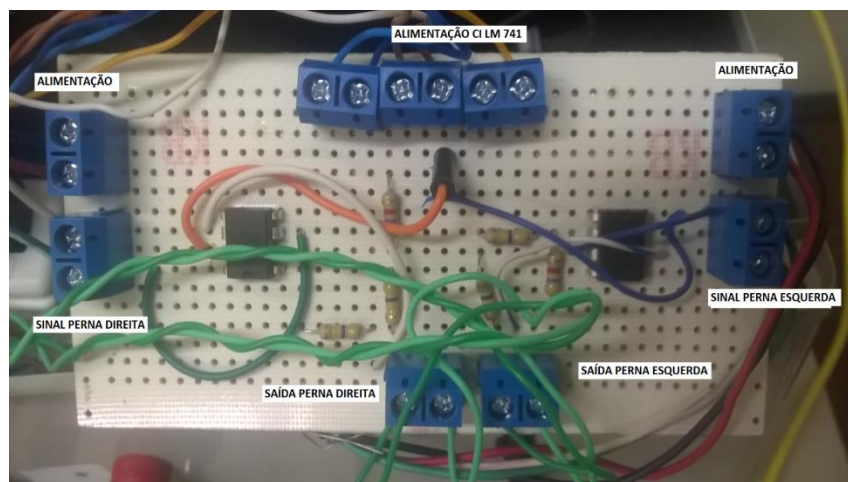


Figura 27 – Placa de circuito para os amplificadores operacionais
Fonte: Própria.

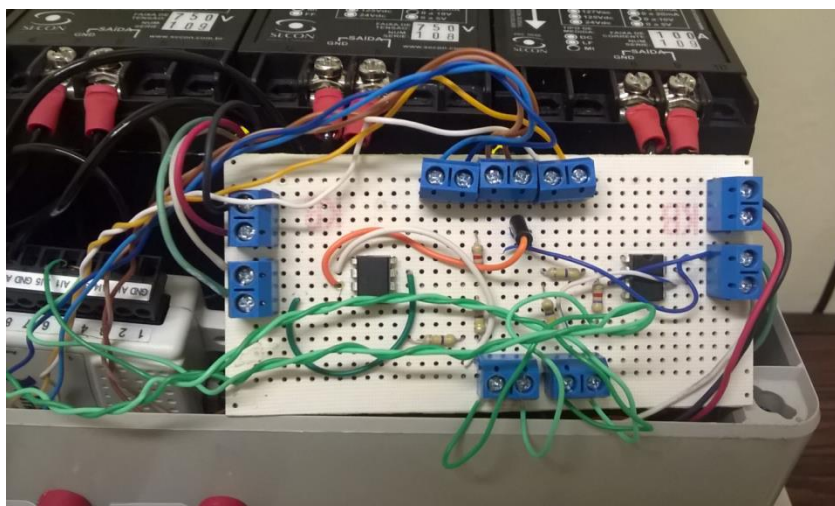


Figura 28 - Caixa de aquisição de dados com os amplificadores operacionais;

Fonte: Própria.

Na caixa de aquisição, além do amplificador, foram acomodados também, o Datalogger e os transdutores, como pode ser visto na Figura 28. Os terminais de entrada e saída desta são utilizados para a alimentação do Datalogger (placa de aquisição NI6009), das células de carga e do circuito amplificador. Há também uma saída para o cabo USB, que faz a interligação do Datalogger com o computador, e uma entrada para os cabos das células de carga.

3.2.4 Gerador

A máquina elétrica a ser utilizada como gerador nos foi cedida pelo professor orientador, e, como já mencionado no desenvolvimento teórico, é uma máquina síncrona com ímã permanente no rotor, Figura 29.



**Figura 29 - Máquina elétrica utilizada como gerador.
Fonte: Própria.**

Para sua fixação na bicicleta ergométrica, foi utilizada uma plataforma de apoio com molas nas extremidades, cuja função é a de manter o eixo do rotor pressionado com o eixo da roda girante, como mostra a Figura 30.



**Figura 30 - Detalhe de fixação do gerador e conexão com polia
Fonte: Própria.**

Na conexão de saída do gerador será ligado o retificador trifásico, explicado a seguir.

3.2.5 Retificador

Para confeccionar o retificador trifásico, tivemos que associar a uma ponte monofásica mais dois diodos, como demonstrado na Figura 31, para termos assim um retificador trifásico. A Figura 32 mostra as conexões da saída do gerador e entrada no retificador, e a saída do retificador para a lâmpada incandescente.



Figura 31 - Detalhes do retificador de onda completa em ponte utilizado.
Fonte: Própria.

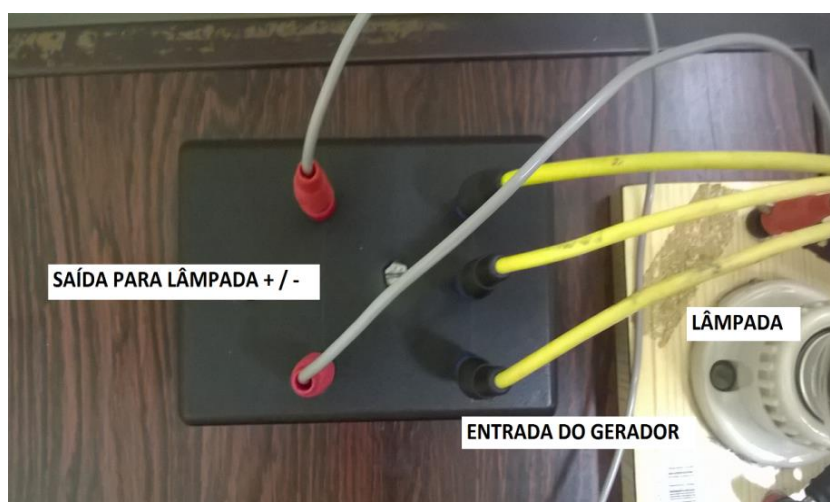


Figura 32 - Conexão gerador / retificador / carga
Fonte: Própria.

Para sua conexão no sistema, ligamos os terminais de saída do gerador a sua entrada, e os terminais de saída deste retificador a lâmpada incandescente, assim como também os transdutores de corrente e tensão, para as medidas de tensão e corrente geradas pelo gerador.

3.2.6 Lâmpada Incandescente

A carga utilizada no circuito para aproveitamento da energia gerada será 01 lâmpada do tipo incandescente que possui uma potência de 100W e será alimentada a partir da saída do retificador trifásico em +/- Vcc.

A Figura 33 ilustra a mesma, e como esta foi fixada e anexada ao módulo experimental.

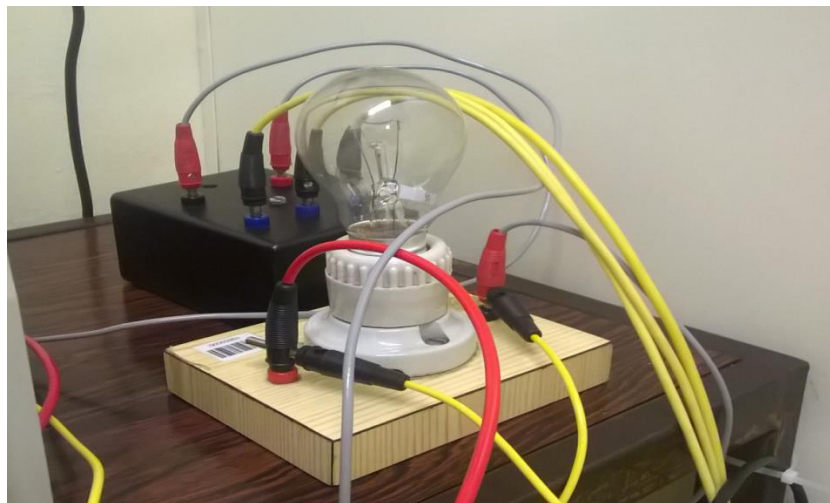


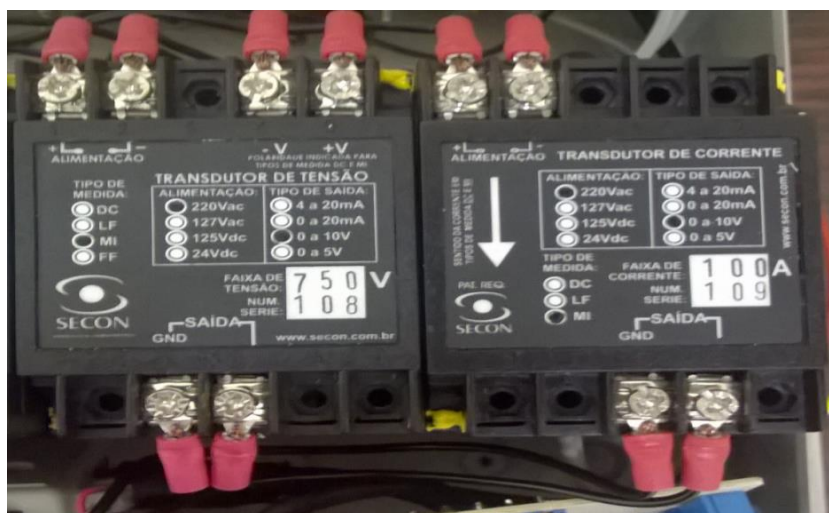
Figura 33 - Detalhe da lâmpada incandescente.
Fonte: Própria

Assim, com a conexão do retificador a lâmpada, fecha-se o circuito composto por todos os dispositivos presentes no módulo experimental.

3.2.7 Transdutores de tensão e de corrente

Para leitura de tensão e corrente no LabVIEW, é necessário que os valores destes estejam dentro da margem de leitura do software que é de 0V a 5V. Os transdutores foram incluídos no experimento para reduzir o nível de tensão e corrente fornecidos pelo gerador, a um nível que se encaixe dentro desses limites, ou seja, irão funcionar de maneira similar a um transformador de potencial e a um transformador de corrente, que reduzem os valores originais de corrente e tensão, para possibilitar sua leitura em um dispositivo com limites inferiores de sensibilidade.

A Figura 34 ilustra os transdutores utilizados no sistema.



**Figura 34 - Transdutores de corrente e tensão utilizados no experimento.
Fonte: Própria.**

Em nosso experimento, a tensão foi reduzida em 150 vezes e a corrente em 20 vezes através desses transdutores. Essa redução é compensada por fatores multiplicadores na linha de programação do LabVIEW, fazendo com que os valores apresentados sejam equivalentes aos valores reais. A Figura 35 traz a linha de programação utilizada, e estas constantes destacadas.

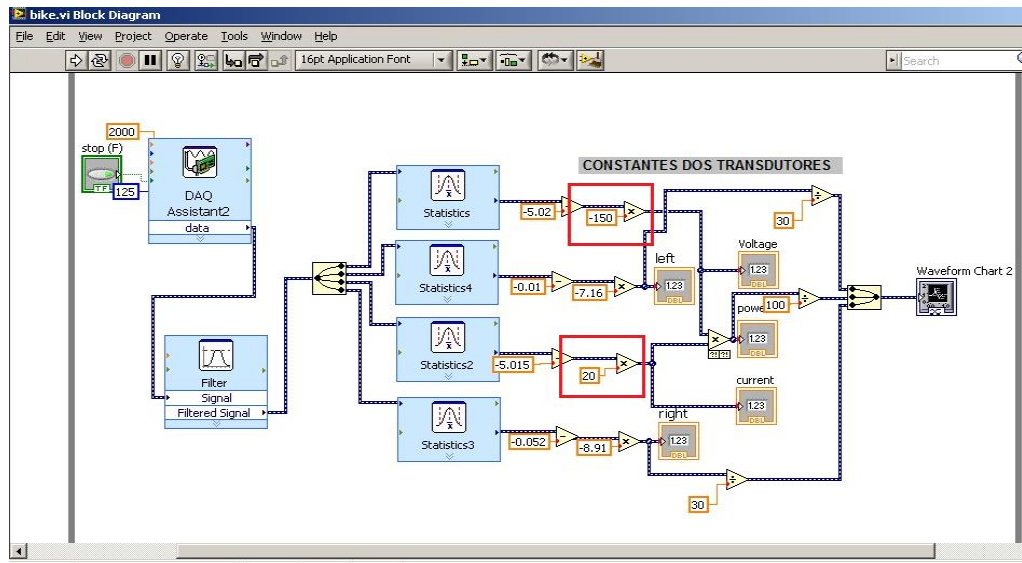


Figura 35 - Linha de programação do LabVIEW, com o destaque das constantes multiplicadoras utilizadas pelos transdutores.

Fonte: Própria.

Os valores de ajuste do Labview ficaram sendo:

- Transdutor de corrente: 150
- Transdutor de Tensão: 20

3.2.8 Placa de Aquisição

A placa de aquisição NI 6009 é um módulo de leitura e registro de variáveis analógicas e digitais. Neste experimento, ela possibilita a conversão A/D dos sinais a serem processados no LabVIEW. A Figura 36 ilustra a placa NI 6009.

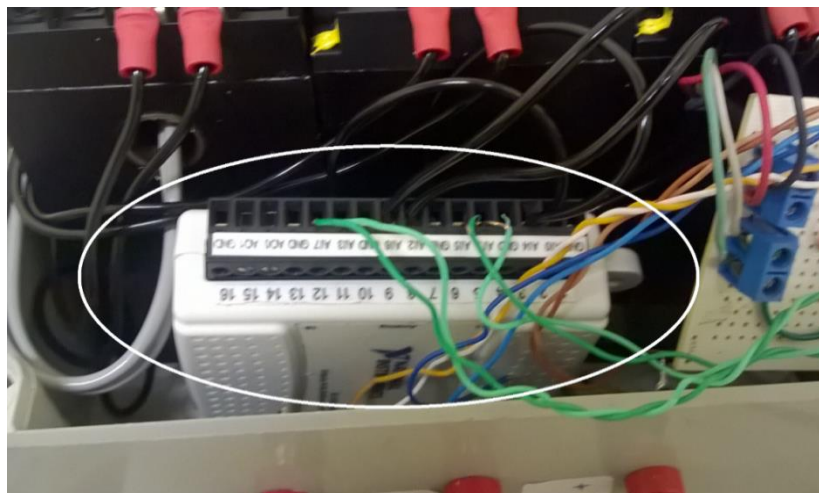


Figura 36 – Placa de aquisição utilizada.
Fonte: Própria.

Neste dispositivo, serão ligadas as saídas dos amplificadores operacionais e as saídas dos transdutores de tensão e corrente. Os sinais enviados são tratados pela placa de aquisição, repassando-os ao LabVIEW, conforme Figura 37.

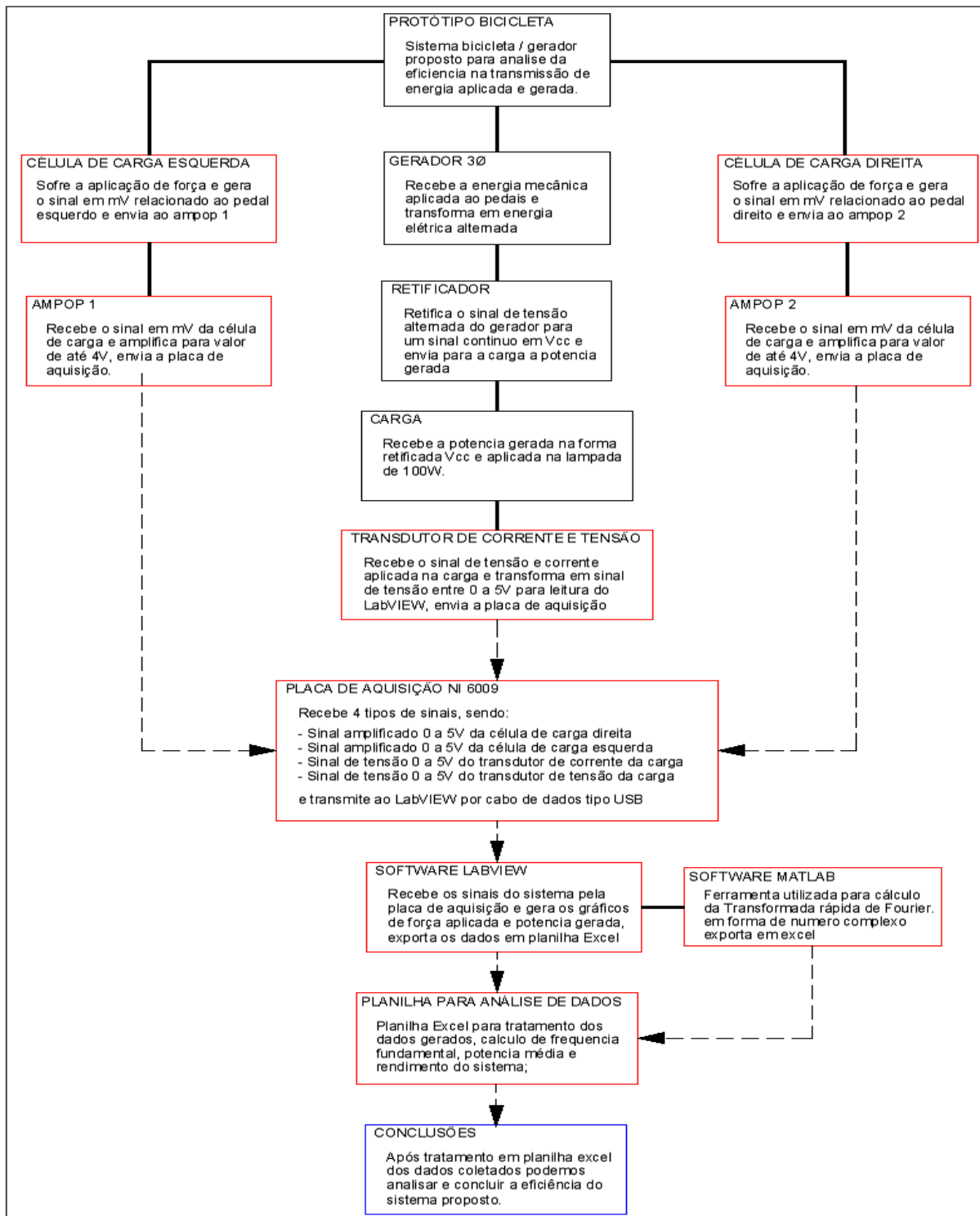


Figura 37 - Diagrama esquemático de aquisição e tratamento de dados.
Fonte: Própria.

3.3 DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO GERAL DO SISTEMA E METODOLOGIA DE COLETA DE DADOS

O funcionamento do sistema inicia-se com a aplicação de uma força aos pedais, por quem realiza a atividade física. Esta força movimenta os pedais, todo o sistema de polias interconectadas a uma correia, e também o eixo do gerador síncrono, que está acoplado a esta associação e assim gera energia elétrica em corrente alternada.

A tensão e corrente alternada são retificadas e transformadas em contínuas por meio do retificador. Na saída deste circuito de retificação, tem-se a carga conectada.

Nos pedais, temos fixas células de carga para medição da força aplicada aos mesmos, cujos valores são amplificados e registrados no software LabVIEW. Na saída do gerador, está ligado o retificador trifásico e nos terminais da lâmpada são conectados os transdutores de tensão e de corrente, em paralelo e em série com o circuito, respectivamente, além da conexão de dois multímetros, para que sejam registrados os valores de tensão e corrente gerados tanto no LabVIEW quanto nos multímetros, e possamos ter uma aferição mais confiável.

Coletou-se do LabVIEW, os valores instantâneos de massa aplicados nas células de carga e de potência elétrica gerada.

3.3.1 Calibração do sistema

Para o ajuste da célula de carga, primeiramente, tivemos que levar em consideração que o sinal proveniente desta, que é da ordem de 0 a 20 mV, é amplificado 200 vezes, chegando à entrada da placa em uma faixa de 0 a 4 V, o que em termos de força significa um valor de 0 a 30 kgf, isto é, 0 V representam uma ausência de força na célula de carga, e 4 V representa uma força de 30 kgf, ou seja, ainda é necessário um fator multiplicador no LabVIEW que torne o valor apresentado

no software numericamente equivalente ao valor real da força aplicada a célula de carga.

Outro fator que tivemos que levar em consideração também, é a existência de ruídos no sistema, que podem adulterar as leituras, fazendo com que o valor inicial medido sem carga seja diferente de zero. Para eliminar esses ruídos, foi adicionado um filtro no próprio programa, além da adição de um valor inicial para que a medição da célula de carga, sem peso, seja nula, como pode ser visto na Figura 38.

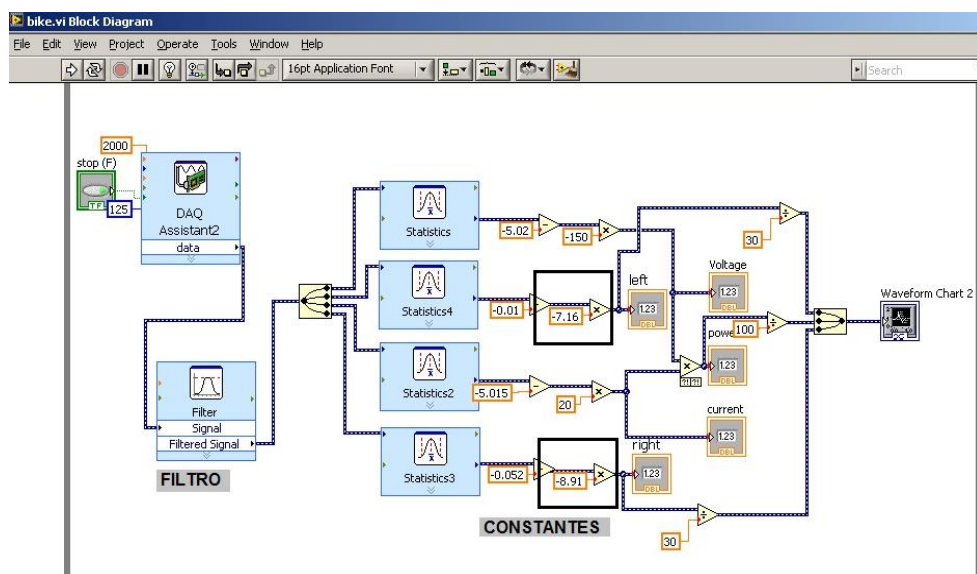


Figura 38 - Filtro e constantes em pu na linha de programação do LabVIEW.

Fonte: Própria.

Os valores de ajuste do Labview ficaram sendo:

- Célula de carga direita: -7,16
- Célula de carga esquerda: -8,91

Para encontrar os fatores multiplicadores das células de carga, utilizamos anilhas com o valor de massa já conhecido, acomodamos elas sobre as células de carga, conforme na Figura 39, fizemos a aferição no LabVIEW e alteramos os valores dos coeficientes presentes na linha de programação deste para mais ou para menos, de acordo com os valores apresentados, para que estes sejam o mais próximo do peso das anilhas.

A calibração foi feita em 5, 10 e 15 kgf para cada célula de carga, e após a alteração dos coeficientes, encontramos os valores apresentados na Tabela 04.



Figura 39 - Calibração com anilhas de 5 kgf cada.
Fonte: Própria.

Quantidade de Anilhas	Peso (balança)	Peso (LabVIEW)
1	5,045 kgf	5,03 kgf
2	9,982 kgf	9,91 kgf
3	15,035 kgf	15,03 kgf

Tabela 4 - Valores de calibração das células de carga.
Fonte: Própria.

Feitas estas alterações, conseguimos ajustar o sistema de medição das células de carga, de uma maneira que os valores de massa aplicados aos pedais, sejam os mesmos que os valores apresentados pelo LabVIEW.

Outro ajuste a ser feito, diz respeito aos transdutores de tensão e corrente. Como os sinais de tensão e corrente que são provenientes do gerador, são alterados pela ação dos transdutores, tivemos que proceder a sua correção e adaptação, para obter os valores reais medidos de tensão e corrente, e para isto, inserimos constantes multiplicadoras na linha de programação do LabVIEW, como já foi demonstrado na Seção 3.2.7.

Tivemos que ajustar nos transdutores também, o valor de referência da tensão e corrente do gerador apresentados pelo LabVIEW, que deveriam ser nulos quando o sistema não está em funcionamento, mas, devido à presença de ruídos do sistema, tem um valor inicial diferente de zero.

Para corrigir esta defasagem, foram inseridas constantes na linha de programação, como pode ser visto na Figura 38, que deslocaram a referência para zero. Assim sendo, só se verifica o aparecimento de uma tensão medida, quando o sistema efetivamente é colocado em funcionamento.

Após estes ajustes, para verificar se a tensão e correntes geradas pelo gerador e medidas pelo LabVIEW são iguais, ligamos a saída da lâmpada dois multímetros, para medir os valores de corrente e tensão gerados, e assim, confrontar estes com os valores apresentados no software.

Após estes procedimentos, percebemos que as medidas de tensão e corrente apresentadas pelo software, estão coerentes e próximos dos valores reais medidos pelos multímetros.

3.3.2 Aquisição dos dados

Para a aquisição de dados, utilizamos a plataforma LabVIEW e a placa NI6009, como já foi descrito anteriormente. Dentro do ambiente gráfico do software, foi desenvolvido um diagrama de blocos, onde foram definidos alguns coeficientes, como podem ser verificados na Figura 38.

Com a adição destes coeficientes na linha de programação do LabVIEW, fizemos com que os valores de potência elétrica e da força aplicada aos pedais, fiquem entre zero e um, ou seja, valores em PU. Através este método, podemos analisar tanto graficamente quanto instantaneamente os dados medidos.

Definiu-se a potência base como 100 W, e para a força, como já é o padrão das células de carga, 30 kgf. Ou seja, para saber qual a potência real medida, multiplica-se por 100 o valor em PU da potência apresentado pelo software, e para descobrir o valor da força, multiplica-se o valor em PU por 30 kgf.

Os dados geram em tempo real um gráfico da massa nos pedais e da potência gerada, como demonstrado na Figura 40. É também gerada uma base de dados das medidas efetuadas, que posteriormente é exportada para uma planilha no excel, para que estes possam ser analisados e tratados.

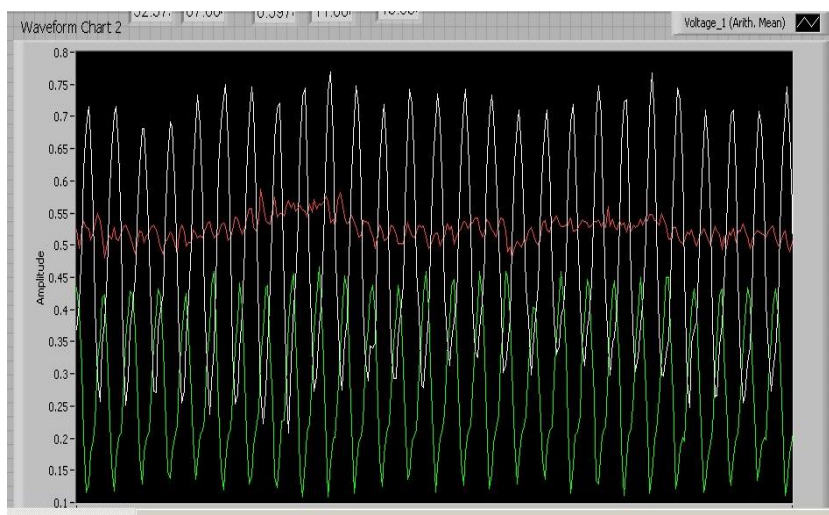


Figura 40 - Gráfico LabVIEW.
Fonte: Própria.

3.3.3 Tratamento dos dados

A partir dos dados obtidos, iremos fazer uma análise e um tratamento matemático destes, a fim de encontrar o dado que é o principal objetivo desse trabalho, o rendimento. Para mensurá-lo, como já demonstrado na introdução teórica, é necessário encontrar a potência mecânica de entrada, e a potência elétrica de saída.

A potência elétrica de saída, é relativamente fácil de se determinar, basta apenas multiplicarmos os valores de tensão e corrente medidos a cada instante, e fazermos uma média. Esta multiplicação dos sinais de tensão e corrente já é feita na própria linha de programação do software, com a inclusão de um bloco que será responsável por fazer esta operação.

Já para encontrar a potência mecânica de entrada, precisamos do conjugado mecânico e da frequência angular, como já definido na Equação (5).

Para obter a frequência mecânica média, foi necessário fazer uma análise do gráfico obtido na pedalada, onde definimos que cada volta completa no eixo dos pedais, significa uma onda completa no gráfico gerado no software (valores em PU de potência elétrica e massa), como mostra a Figura 41, logo, ao descobrirmos a frequência média desse sinal gerado, saberemos a frequência mecânica no eixo.

O caminho encontrado foi fazer uma transformada rápida de Fourier, levando os dados de massa obtidos em PU do domínio do tempo para o domínio da frequência, e assim, descobrir qual a frequência fundamental do sistema.

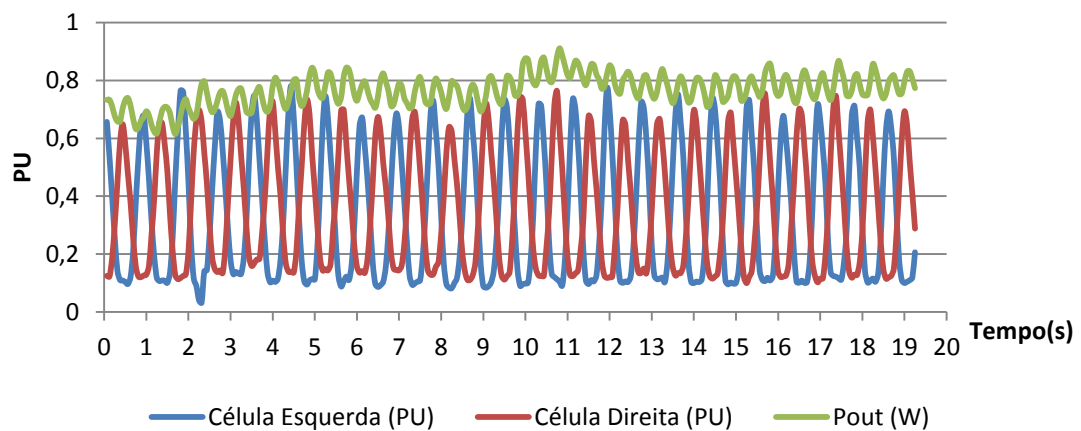


Figura 41 - Gráfico Força e Potência.
Fonte: Própria.

No exemplo da Figura 42 a frequência fundamental está no ponto 18, o que significa que o sinal descrito no gráfico no domínio do tempo possui 18 ciclos completos, ou que foram desenvolvida 18 voltas completas no pedal durante o intervalo de tempo analisado.

Como sabemos que o LabVIEW apresenta 16 medições por segundo, e sabendo o numero total de medições, é de 307, podemos encontrar o intervalo de tempo total da aquisição de dados e, a partir disso, descobrimos a frequência mecânica média no eixo, dividindo o numero de voltas pelo intervalo de tempo calculado. Logo, no exemplo demonstrado, a frequência mecânica encontrada foi:

$$f = \frac{18}{18/16} = 0,9260Hz \quad (16)$$

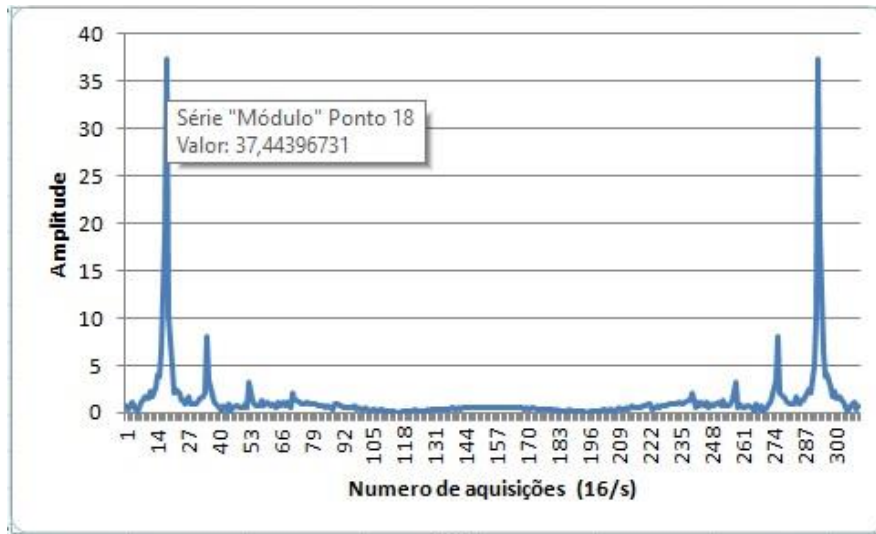


Figura 42 - Grafico FFT.
Fonte: Própria.

Para termos o conjugado mecânico (resultante das forças aplicadas ao eixo), é preciso saber a distância da força ao eixo, o ângulo em que essa força é aplicada, e a própria força. Como os dados coletados das células de carga representam a força aplicada aos pedais em PU, precisamos multiplicar esses valores por 30 Kgf (valor da massa base), mas como precisamos do valor da força em N (newtons) devemos multiplicar também por g (aceleração da gravidade, aproximadamente 9,8 m/s²), para assim conseguirmos a intensidade da força aplicada.

Como temos dois torques (pedal esquerdo e pedal direito) sendo aplicadas ao eixo, precisamos calcular o conjugado mecânico aplicado a este, ou seja, a soma destes dois torques. Logo:

$$C_m = |F_E * d * \text{sen}(\theta_E) + F_D * d * \text{sen}(\theta_D)| \quad (17)$$

Onde,

C_m = Conjugado mecânico aplicado ao eixo;

F_E = Força no pedal esquerdo;

F_D = Força no pedal direito;

d = Distância entre o pedal e o eixo;

θ_E = Ângulo entre a alavanca e a força aplicada ao pedal esquerdo;

$\theta_D =$ Ângulo entre a alavanca e a força aplicada ao pedal direito.

O primeiro problema encontrado aqui é saber qual ângulo a força aplicada ao pedal faz com a alavanca a cada instante. A Figura 43 e 44 trazem o esquema das forças aplicadas ao pedal durante o movimento, bem como os ângulos que nos interessam. Pode-se observar pela figura, que o ângulo que a força faz com o eixo de alavanca a cada instante (θ), é o mesmo ângulo que esta força faz com a origem dos movimentos, portanto, tendo o ângulo (θ), pode-se encontrar (F_{tan}), que é a força que realiza trabalho no sistema.

Para descobrirmos esses valores, definimos que inicialmente o pé direito deve estar em 0° e o pé esquerdo em 180° , em seguida incrementamos o valor do ângulo a cada medida do LabVIEW. Para descobrirmos esses valores, é necessário saber a posição exata do pedal em pelo menos um instante, e, a partir daí incrementar um valor de ângulo para cada instante, valor este que pode ser calculado.

Para saber qual valor de ângulo deve ser incrementado a cada instante, basta calcular a velocidade angular, a partir da frequência já obtida anteriormente. Como sabemos que são obtidos 16 dados por segundo, dividimos a velocidade angular por 16, então sabemos qual o valor de ângulo a ser incrementado para cada valor de força obtido. A relação aplicada é a descrita pela Equação (18).

$$\theta = \frac{2.\pi.f}{16} \quad (18)$$

Agora resta saber a posição do pedal em pelo menos um instante. Para isso é necessário conhecer a dinâmica de uma pedalada e descobrir em qual posição é aplicada a maior intensidade de força. Segundo Guimarães (2005), o ponto onde ocorre a maior intensidade da força aplicada é muito próximo de 90° , como pode ser visto na Figura 44, quando $\theta = 90^\circ$. Então, basta encontrar o primeiro valor de pico medido por uma das células de carga, onde podemos afirmar que o pedal em questão está a 90° da referência naquele instante, e assim implementar o valor do ângulo para cada instante subsequente. Como o outro pedal está sempre defasado ou adiantado em 180° , logo, pode-se mensurar o valor de ambos os ângulos (direito e esquerdo) para cada medida realizada.

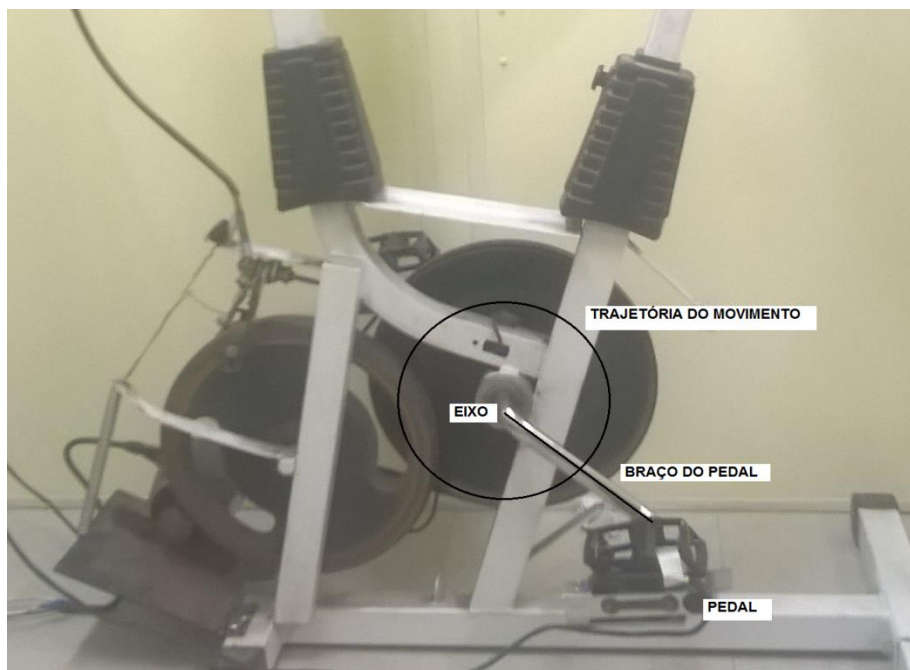


Figura 43 - Identificação dos elementos do movimento
 Fonte: Própria.

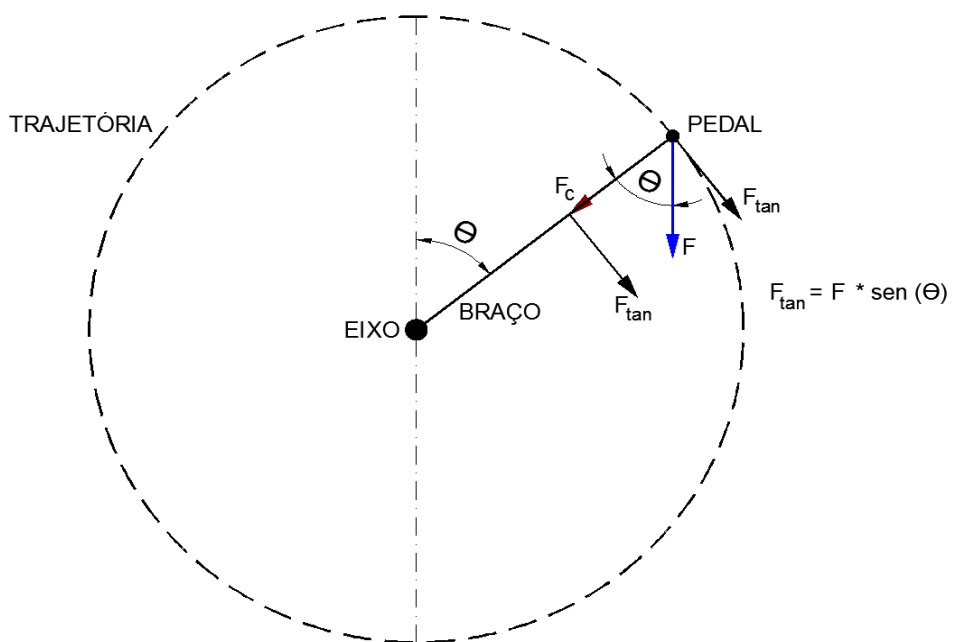


Figura 44 - Desenho esquemático com a descrição das forças atuantes no pedal.
 Fonte: Própria.

Agora finalmente temos as variáveis necessárias para o cálculo da potência mecânica aplicada ao eixo dos pedais. Logo:

$$P_{in} = C_m * \omega_{mec} \quad (19)$$

Onde,

P_{in} = Potência aplicada ao eixo;

C_m = Conjugado mecânico aplicado ao eixo;

ω_{mec} = Velocidade angular no eixo de rotação.

Após esses cálculos, podemos obter a potência de entrada e de saída no sistema a cada instante medido. Como o propósito do trabalho é levantar o rendimento do sistema, é necessário ter os valores médios de potência mecânica de entrada e de potência elétrica de saída. O rendimento será obtido a partir da Equação (20).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (20)$$

Onde,

η = Rendimento;

P_o = Potência elétrica;

P_{in} = Potência mecânica.

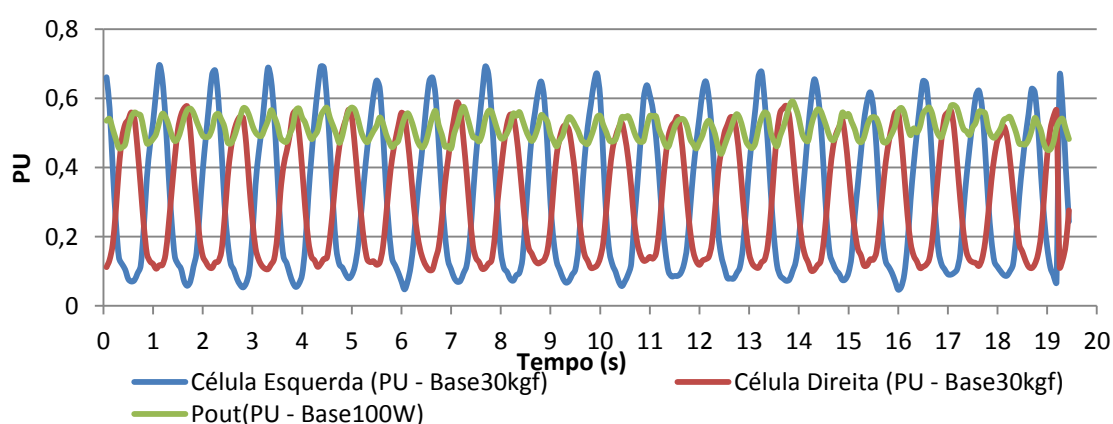
4 ANALISE DE RESULTADOS

Após a definição dos materiais utilizados e a metodologia de tratamento dos dados no capítulo anterior, elaborou-se uma planilha para cada aquisição, a partir da qual foi realizada a análise do comportamento das variáveis envolvidas que determinam o rendimento quando há diferentes indivíduos realizando o experimento, e diferentes frequências de rotação aplicadas aos pedais.

A partir destas considerações, descreveremos pelo método gráfico os resultados obtidos. Os gráficos descrevem no tempo, o comportamento das forças aplicadas a cada célula de carga, assim como da potência elétrica gerada. Foram escolhidos três indivíduos (1, 2 e 3), e foram desenvolvidos três aquisições de dados por indivíduo, sendo que cada aquisição foi feita em velocidades para cada indivíduo.

4.1 AQUISIÇÃO PARA O PRIMEIRO INDIVÍDUO

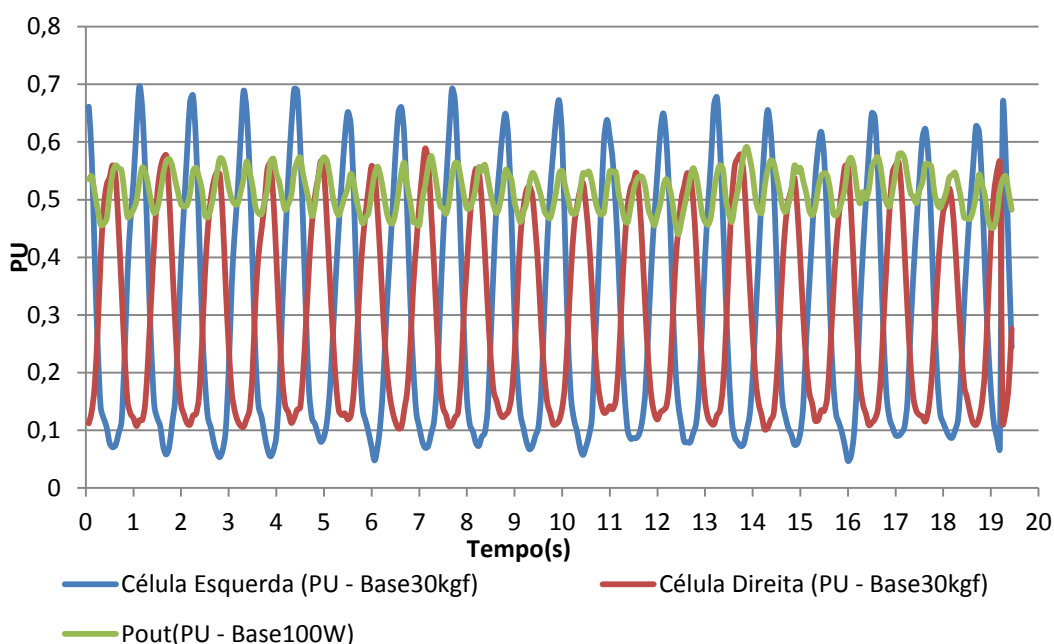
Para uma velocidade de 55,56 rpm, o gráfico da força e potência com relação ao tempo, está mostrado na Figura 45.



**Figura 45 – Gráfico Força no pedal e Potencia gerada (indivíduo 1 - 55,56 rpm) .
Fonte: Própria.**

Observa-se pelo gráfico que há uma diferença entre as forças aplicadas pela perna esquerda e direita, isto é, o indivíduo apresenta uma tendência de realizar mais força com a perna esquerda durante a atividade física. O rendimento calculado para esta situação ficou em torno de 60,15%.

Para uma velocidade de 56,28 rpm, a Figura 46 mostra o gráfico da força e potência com relação ao tempo.

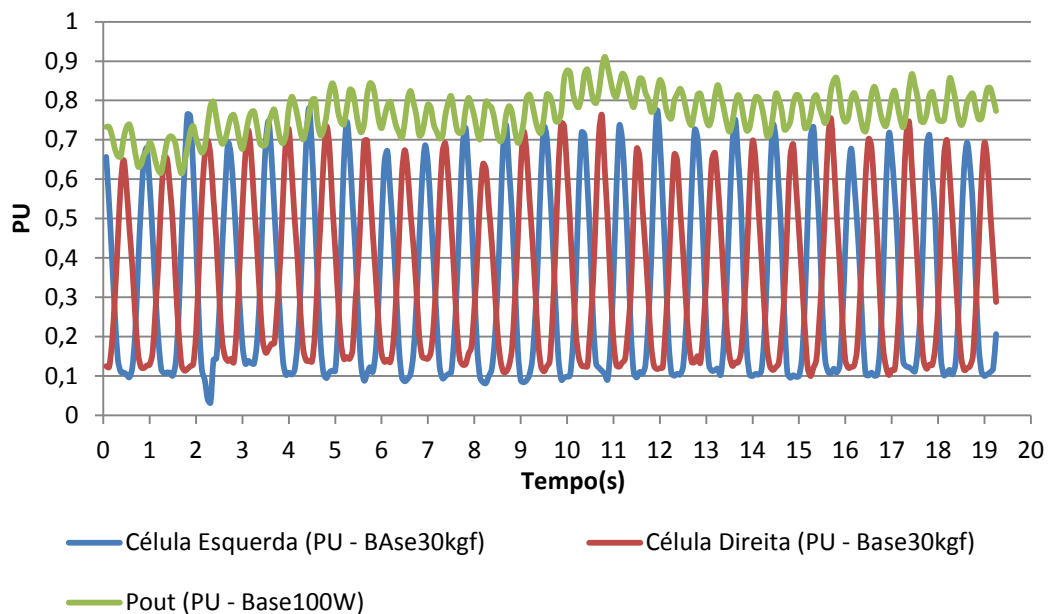


**Figura 46 – Gráfico Força no pedal e Potencia gerada (indivíduo 1 - 56,28 rpm) .
Fonte: Própria.**

Novamente, em comprovação a coleta anterior, observa-se uma predominância da perna esquerda do indivíduo na aplicação da força.

O rendimento calculado para esta situação ficou em torno de 60,65%.

Aumentando a velocidade de pedalada para 81,04 rpm, temos a relação entre força e potência pelo tempo, descrito na Figura 47.



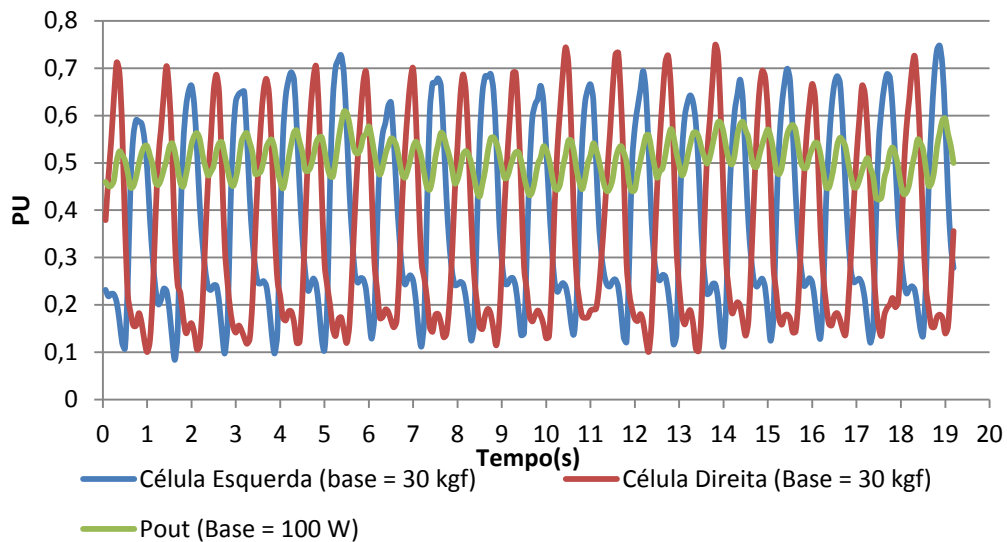
**Figura 47 – Gráfico Força no pedal e Potencia gerada (indivíduo 1 – 81,04 rpm) .
 Fonte: Própria.**

Como nas aquisições anteriores, observa-se que o indivíduo apresenta uma tendência de realizar mais força com a perna esquerda durante a atividade física. O rendimento calculado para esta situação ficou em torno de 57,97%

Nas três aquisições do indivíduo 1, em diferentes velocidades, o rendimento ficou próximo de 60%, resultando em um rendimento médio de 59,59.

4.2 AQUISIÇÃO PARA O SEGUNDO INDIVÍDUO

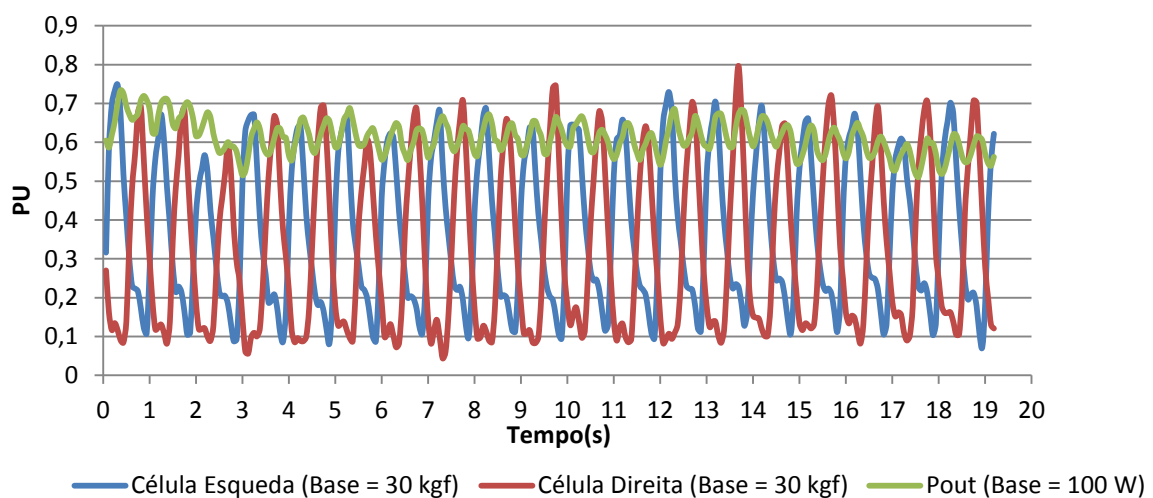
Para uma velocidade de 53,16 rpm, a Figura 48 mostra o gráfico da força e potência com relação ao tempo.



**Figura 48 – Gráfico Força no pedal e Potencia gerada (indivíduo 2 – 53,16 rpm) .
Fonte: Própria.**

Diferentemente do indivíduo 1, observa-se pelo gráfico que há uma diferença mínima entre as forças aplicadas pela perna esquerda e direita, isto é, o indivíduo 2 apresenta uma tendência de realizar forças praticamente iguais entra a perna esquerda e a direita durante a atividade física. O rendimento calculado para esta situação foi de 60,12 %

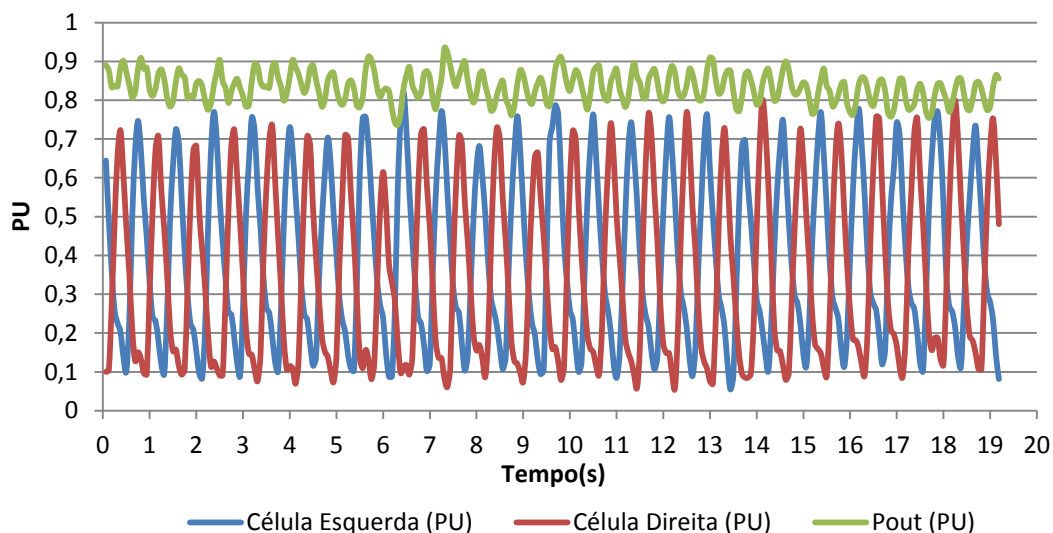
Para uma velocidade de 59,41 rpm, o gráfico da força e potência pelo tempo é descrito na Figura 49.



**Figura 49 – Gráfico Força no pedal e Potencia gerada (indivíduo 2 – 59,41 rpm) .
Fonte: Própria.**

Assim como no gráfico anterior, observa-se um equilíbrio de forças entre as pernas direita e esquerda. O rendimento calculado para esta situação foi de 59,16 %

Para uma velocidade de 75,05 rpm, o gráfico da força e potência pelo tempo é descrito na Figura 50.



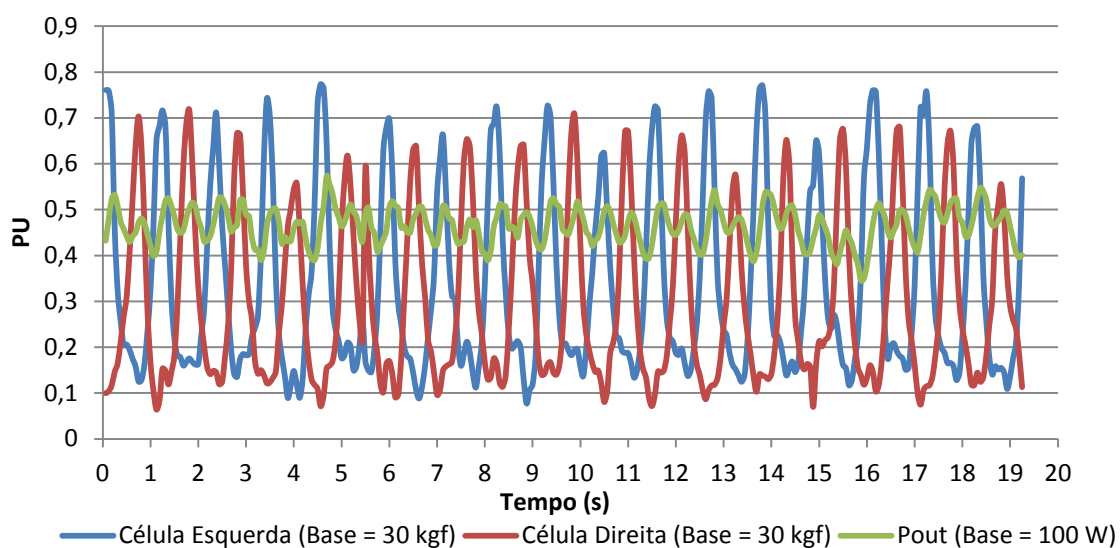
**Figura 50 – Gráfico Força no pedal e Potencia gerada (indivíduo 2 – 75,05 rpm) .
Fonte: Própria.**

Mais uma vez, nota-se que a intensidade das forças aplicadas aos pedais são muito parecida em ambas as pernas. Pode-se afirmar que existe um equilíbrio nas forças aplicadas ao pedal. O rendimento calculado para esta situação foi de 58,48 %.

Nas três aquisições do indivíduo 2 em diferentes velocidades, o rendimento ficou próximo de 60%, resultando em um rendimento médio de 59,26%.

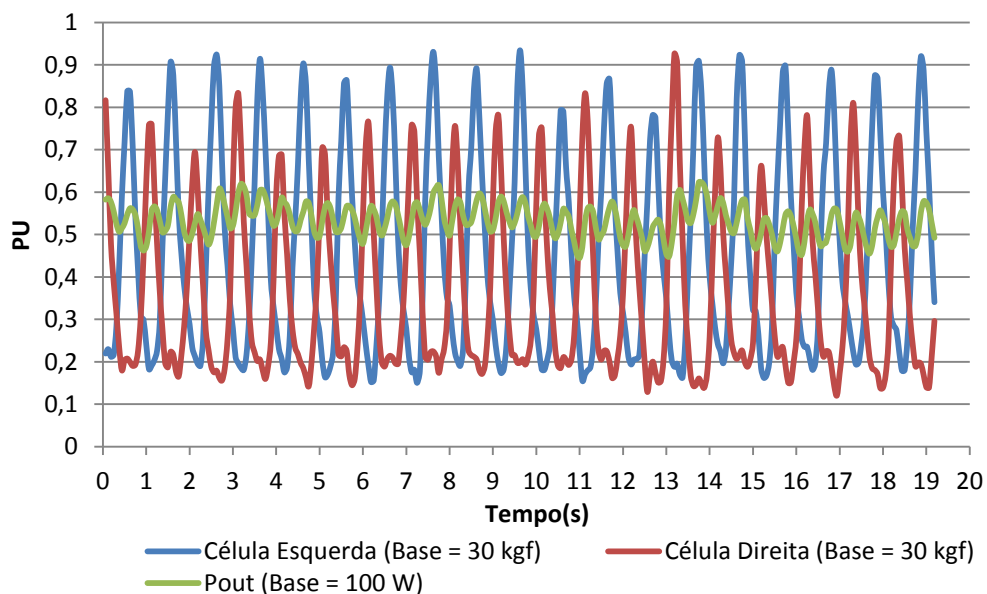
4.3 AQUISIÇÃO PARA O TERCEIRO INDIVÍDUO

Para uma velocidade de 52,98 rpm, o gráfico da força e potência pelo tempo é descrito pela Figura 51.



**Figura 51 – Gráfico Força no pedal e Potencia gerada (indivíduo 3 – 52,98 rpm) .
Fonte: Própria.**

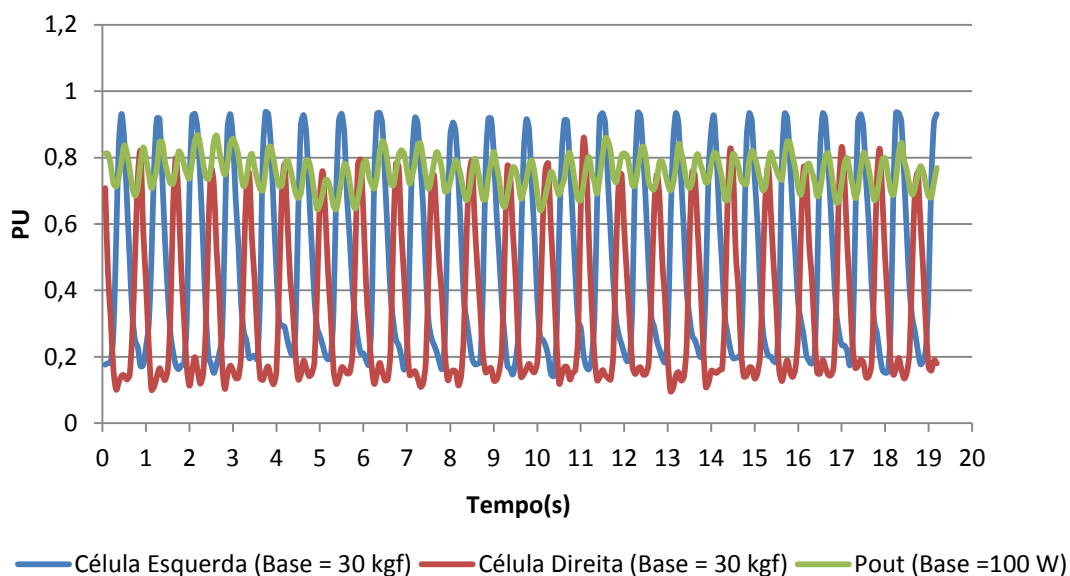
É possível observar no gráfico que, assim como o indivíduo 1, o indivíduo 3 aplica uma intensidade maior de força na perna esquerda. O rendimento calculado para esta situação foi de 57,70%. Para uma velocidade de 59,41 rpm, o gráfico da força e potência pelo tempo encontrado é descrito na Figura 52.



**Figura 52 – Gráfico Força no pedal e Potencia gerada (indivíduo 3 – 59,41rpm) .
Fonte: Própria.**

Assim como no caso anterior, o indivíduo mostra um maior esforço com a perna esquerda. O rendimento calculado para esta situação foi de 58,88%

Para uma velocidade de 68,80 rpm, o gráfico da força e potência pelo tempo é descrito na Figura 53.



**Figura 53 – Gráfico Força no pedal e Potência gerada (indivíduo 3 – 68,80 rpm) .
Fonte: Própria.**

Os gráficos apresentados mostraram um padrão para o indivíduo 3, explicitando a maneira que esse indivíduo aplica as forças nas células esquerda e direita, exercendo uma força maior no pedal esquerdo. O rendimento calculado para esta situação ficou em torno de 60,82 %.

Nas três aquisições do indivíduo 3 em diferentes velocidades, o rendimento ficou próximo de 60%, resultando em um rendimento médio de 60,10%.

De um modo geral, cada indivíduo demonstra ter um perfil diferente ao pedalar, que está bem caracterizado pelo sistema implementado, mas mesmo com essas diferenças e em diferentes intensidades, o rendimento calculado ficou em torno de 60,00%.

A Tabela 5 traz os valores obtidos de rendimento para cada situação descrita acima, bem como suas respectivas potências médias, de entrada e de saída.

Tabela 5 – Rendimentos calculados.

Aquisição	Velocidade (rpm)	Pin(w)	Pout (w)	η
Indivíduo 1	55,56	85,55	51,46	0,6015
Indivíduo 1	56,29	85,64	51,94	0,6065
Indivíduo 1	81,04	114,6	66,42	0,5797
Indivíduo 2	53,16	81,31	48,88	0,6012
Indivíduo 2	59,41	103,5	61,26	0,5916
Indivíduo 2	75,05	143,3	83,83	0,5849
Indivíduo 3	52,99	85,98	49,59	0,5767
Indivíduo 3	59,41	90,52	53,30	0,5888
Indivíduo 3	68,79	125,3	76,24	0,6082

Fonte: Própria.

A partir destes valores, calcula-se um rendimento médio para o sistema, chegando ao valor de 59,32% de eficiência.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adaptação feita na bicicleta ergométrica, para a fixação do gerador e das células de carga se mostraram eficientes, pois durante as coletas de dados, todo o sistema permaneceu estável. Houve liberdade para pedalar, sem que fosse preciso se preocupar com toda a fixação, que foi fixa na própria bicicleta e disposta de uma maneira, que não permitisse o rompimento ou embaraço destes.

O software utilizado e os demais periféricos atenderam o objetivo proposto, pois, após os ajustes feitos nos elementos presentes no módulo experimental, constatamos a proximidade entre as medidas reais e as medidas apresentadas pelo software, comprovando assim, que todo o sistema estava bem ajustado e todos os seus elementos foram projetados e implementados corretamente.

A determinação do rendimento no sistema também atingiu o objetivo proposto, pois, mesmo sendo aplicadas velocidades diferentes e por pessoas diferentes ao gerador, o valor do rendimento se mostrou razoavelmente estável, com um pequeno desvio entre as medidas feitas, fato este que pode ser explicado pelas pequenas diferenças de tensão na mola de fixação, assim como também, pelos ruídos presentes no sistema, pela perda de energia por Efeito Joule, energia sonora, vibração, entre outras.

Pode-se comprovar que, apesar de existirem perdas, há uma energia elétrica que pode ser gerada e aproveitada em determinadas situações do nosso cotidiano, como a atividade de se pedalar uma bicicleta, que é considerável e deve ser valorizada, pelo fato de ser uma energia limpa.

O sistema proposto de geração pode facilmente ser adaptado a bicicletas ergométricas, como de uma academia, por exemplo, apenas com a fixação do gerador como foi demonstrado por meio deste projeto. Assim sendo, se levarmos em consideração o número de academias e bicicletas ergométricas existentes, há um grande potencial de fontes geradoras de energia elétrica que poderiam ser aproveitadas. Essa energia pode ser utilizada para carregamento de celulares, armazenamento em energia térmica, entre outras.

Tem-se também a possibilidade de em trabalhos futuros fazer o teste de medição em circuito sem carga para assim ter noção dos valores reais gerados que estariam sem computar as perdas de circuito elétrico.

Há melhorias que podem ser feitas no sistema como um todo, como a utilização de um melhor acoplamento entre o eixo do gerador e o volante de inércia, a utilização de um sistema de controle para manter constante a potência elétrica gerada e um módulo de geração e armazenamento de energia térmica.

De um modo geral, pode-se concluir que a implementação do sistema atendeu as expectativas dos objetivos propostos e, nos trabalhos futuros, pode-se alterar alguns componentes tais como, o gerador, o elemento de fixação, o retificador entre outros, e comparar os rendimentos resultantes das alterações com os obtidos neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Pedro A. O. **Transdutores para medidas de deslocamentos lineares**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Notas de aula, março de 2004.

BARBI, Ivo. **Eletrônica de potência**. 6. ed. Florianópolis: Edição do Autor, 2006.

BATISTA, Marcelo V., BRAMBILLA, Milton C. **Geração e Controle de Energia Elétrica em Bicicleta Ergométrica**. Trabalho de conclusão de curso de graduação de Tecnologia em Eletrotécnica em Automação Industrial, do DAELT, UTFPR, 2010.

BOOTH, F. W.; GORDON, S.E.; CARKSIBM C. J.; HAMILTON, M. T. **Waging war on modern chronic diseases: primary prevention through exercise biology**. *Jornal of Applied Physiology*, Bethesda, v.88, n.2, p.774-87, 2000.

CANESIN, C. A. **Eletrônica de Potência I**, Apostila do Professor-FEIS-UNESP, Ilha Solteira(SP), 1991.

CONDOMINIOS VERDES. **Academia sustentável nos EUA produz energia elétrica durante as aulas**. Condomínios Verdes. Disponível em: <http://www.condominiosverdes.com.br/academia-sustentavel-nos-euaproduzenergia-eletrica-durante-aulas/>. Acesso em 28 Abr. 2015.

DEL TORO, Vicent. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994.

FITZGERALD, A. E. KINGSLEY, Charles. UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas com introdução a eletrônica de potência**. 6ª Ed. São Paulo: Bookman, 2006.

GOLDENBERG, José, VILLANUEVA, Luz Deodoro. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. 2. Ed revisada. São Paulo: EDUSP, 2003.

GUIMARÃES, Antonio. **Aplicação de força no pedal em prova de ciclismo 40 km contra-relógio simulada: estudo preliminar** (Revista Brasileira de Educação Física e Esporte, São Paulo, V.19-N.2, p.105-13, abr./jun. 2005)

JANSEN, A.; STEVELS, A. **Human power: an environmental myth? Proceedings of the TMCE, 13 – 17**, abr. 2004.

KOSOW, Irving L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 4ª ed. Rio de Janeiro: Editora Globo, 1982.

LENZ, André L. **Máquinas Elétricas de ímãs permanentes**. Disponível em: <http://automoveiseletricos.blogspot.com.br/2013/12/maquinas-eletricas-de-imas-permanentes.html> acesso: nov. 2015.

LOPES, Gabriel. **O Impacto da Energia Elétrica Proveniente do Reformador de Etanol e Célula a Combustível: Cenário para a Promoção do Desenvolvimento Socioambiental da Comunidade "Pico do Amor"/MT**. 2009. 96 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

MACIEL, Ednilson S. CORAIOLA, José A. **Máquinas Elétricas**. Curitiba: Editora Base, 2010.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Ambiente gráfico de desenvolvimento de sistemas LabVIEW**. Disponível em: <http://www.ni.com/LABVIEW/pt/> , acesso: Ago. 2016.

NICHELE, Paulo. **Análise de Eficientização Energética e Uso de Fontes de Energia Renováveis em uma Granja de Recria de Aves**. Monografia. Universidade Federal do Paraná, 2010.

PALZ, Wolfgang. **Energia Solar e Fontes Alternativas**. 1ª Ed. São Paulo: Hemus, 2002.

POMILIO, J. A. **Eletrônica de Potencia**. DSE - FEEC - Unicamp, 2014

RAMOS, Vanessa M.; SETÚBAL, Fábio A. N.; JESUS, Keliene M. S. **Academia Eficiente, estudo de caso para geração de energia alternativa**. Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Universidade Federal do Pará, 2013.

RUBENS, Ney. **Presos pedalam e geram energia para postes em MG**. Terra. Disponível em: <http://noticias.terra.com.br/brasil/cidades/presos-pedalam-e-geram-energia-para-postes-em-mg,dfc2dc840f0da310VgnCLD200000bbcceb0aRCRD.html>. Acesso em 20 jun. 2015.

SADIKU, Matthew N. O.; ALEXANDER, Charles K. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**, 5ª edição, Editora AMGH, 2013.

SILVA, Fernanda C.; FANTI, Raphael. **Pedal Verde, Aparelho de exercícios recuperador de energia**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecatronica. Escola Politécnica da USP, 2010

TRANQUILLINE, Bruno. **Projeto de Amplificador Operacional em Tecnologia CMOS**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.