

Projeto de um sistema eletromecânico de acumulação de energia

Trabalho de projeto apresentado para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica

Autor

Elca Tatiana Carvalho Gonçalves

Orientadores

**Professora Doutora Marina Mendes Sargento Domingues
Perdigão**

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Professor Doutor Fernando José Teixeira Estêvão Ferreira

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Professor Doutor Luís Manuel Ferreira Roseiro

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Coimbra, maio 2016

A gratidão é o único tesouro dos humildes.

William Shakespeare

Success consists of going from failure to failure without loss of enthusiasm.

Winston Churchill

If you are not willing to risk the unusual, you will have to settle for the ordinary.

Jim Rohn

Agradecimentos

O caminho que percorri até chegar a reta final desejada foi bastante longo e não foi claramente linear como eu pretendia. Entre as diversas peripécias e complicações que passei para finalizar este projeto, destaco os meus agradecimentos a algumas pessoas, as quais não teria sido possível aqui chegar.

Agradeço à professora Doutora Marina Perdigão pela orientação e compreensão nos diversos momentos da elaboração deste projeto e documento. De igual forma, devo também agradecer ao Professor Doutor Fernando Ferreira pela orientação, sábias explicações e paciência tida. Da mesma forma devo agradecer ao professor Doutor Luís Roseiro, que apesar de todas as ocupações, se mostrou sempre disponível para me explicar e auxiliar na elaboração do projeto e documento final.

Tenho de agradecer à minha família, Maria Carvalho, José Gonçalves e Dora Gonçalves pelo auxílio, apoio e suporte incondicional, durante todo este tempo.

Aos meus amigos, de infância e de curso, pela preocupação e motivação sempre dada. Pelos momentos de boa disposição e pela partilha de conhecimentos.

Ao Rafael Neves, pela amizade, companheirismo, carinho e imensa paciência ao longo do todo este percurso e tempo. Pelas palavras de apoio e ânimo ditas, nos momentos em que nada se vislumbrava certo. Por me incentivar a nunca desistir. Por me acompanhar em todos os meus passos.

A todos, muito obrigada!

Resumo

Em consequência do desenvolvimento tecnológico massivo reside a dependência constante das populações de todos os gadgets existentes: telemóvel/*smartphone*, *tablet/notebook*, *MP3*, *MP4*, camara digital, entre outros. A incorporação de novas características que implicam uma maior capacidade de processamento assim como implementação de novos componentes acarreta um aumento de consumo de energia. Todos os equipamentos eletrónicos precisam de energia elétrica para funcionarem e os sistemas de armazenamento de energia atuais são ainda limitados, tornando-se um problema real, diário e constante. Propostas de solução a este problema tem aparecido com frequência no mercado dando resposta às necessidades sentidas. O retrabalho das soluções leva à criação de novos projetos, capazes de responder amplamente às necessidades exigidas.

Este documento visa descrever o desenvolvimento do projeto de uma plataforma física para produção de energia elétrica através de diversas fontes. As diversas fontes consideradas para o projeto foram força humana, força mecânica e energia solar. A coordenação em segurança de todas estas fontes para produção de energia elétrica foi considerado, desde início, o grande desafio a superar. A estratégia abordada para o desenvolvimento do sistema foi a criação e estudo de diversos sub-sistemas que assemblados originam o sistema geral. Dificuldades e imprevistos de diferentes origens surgiram ao longo do desenvolvimento do projeto, fizeram com que os resultados apresentados não correspondam com as expectativas criadas. Desta forma, não foi possível concluir a montagem de todos os componentes e conseqüentemente não foi possível evidenciar a estrutura em funcionamento, apenas a simulação de alguns componentes em ambiente computadorizado - *MatLab*.

Palavras-Chave: Produção de energia elétrica, atividade física, sistema mecânico, eletrónica de potência.

Abstract

A massive technological development consequence is the continuous dependency of the population in all available gadgets, such as, mobile phone/smartphone, tablet/notebook, MP3, MP4, digital camera and so on. The integration of new characteristics that implies a greater process capacity as well as new components brings a raise of electric energy consumption. All electronic devices need electric power supply to operate and storage systems are still limited which becomes a daily real and constant problem. Suggested solutions to this have been a constant in nowadays market providing answers to actual demands. Reworking these solutions leads to new project creations, capable of meet the desired requirements. The platform on this paper is an example of that.

This document aims to describe the project development of a physical platform of electrical energy generation by multiple sources. For the project, the multiple sources taken were human force, mechanical force and solar energy. The coordination in security and safety of all those sources to electrical energy production was the huge challenge to overcome, since the beginning. The strategy addressed for the system development was the multi creation and study of sub-system that culminated in the overall system. Over the different phases of the project occurred some difficulties and unforeseen events from different origins that did not allow the results matches with the expectations. Therefore it was not possible to assembly all the components and consequently was not possible to show the structure running, only some components computer simulated - *MatLab*.

Keywords: Eletric energy prodution, physical exercise, mechanical system, power electronics.

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	viii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Abreviaturas	xiv
Simbologia	xiv
Abreviaturas	xvi
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1. Enquadramento do tema.....	1
1.2. Motivação.....	6
1.3. Objetivos e Metodologia de Trabalho.....	6
1.4. Estrutura do Documento	7
Capítulo 2 – Descritivo do projeto	8
2.1. Descrição da arquitetura do sistema.....	8
Capítulo 3 – Caracterização elétrica do sistema	11
3.1. Gerador de ímanes permanentes	11
3.2. Retificador trifásico de onda completa	12
3.3. Filtro LC.....	15
3.4. Conversor redutor c.c.-c.c.	16
3.4.1 Controlo em malha fechada do conversor c.c.-c.c. redutor.....	21
3.5. Bateria	24
3.6. Inversor c.c.-c.a.	26
3.7. Estimativa geral de custos de conceção do projeto.....	27
Capítulo 4 – Estudos mecânicos	28
4.1. Estrutura Funcional	28
Capítulo 5 – Implementação e simulações do sistema	35
Capítulo 6 – Material adquirido para implementação do sistema	57
6.1. Material Adquirido.....	57
6.2. Caracterização económica real.....	61
Capítulo 7 – Viabilidade do projeto e conclusão	62
7.1. Viabilidade do projeto.....	62
7.2. Conclusão.....	63
7.3. Proposta de trabalhos futuros	64
Bibliografia	65
Anexos	68
Anexo I – Projeto mecânico: Considerações técnicas para o projeto	68
Anexo II – Projeto mecânico: Detalhe do equipamento	74

Índice de Figuras

Figura 1: Dispositivos eletrônicos de baixa potência [2]	2
Figura 2: Rádio à manivela [5]	3
Figura 3: Bicicleta acoplada a dínamo [7]	3
Figura 4: We watt: Pure Human Power [8]	4
Figura 5: Pavimento Piezoelétrico – Discoteca “Watt”, Holanda [10]	4
Figura 6: Ginásio auto-sustentável, Inglaterra [11]	5
Figura 7: Sapato com sola produtora de energia elétrica [12]	5
Figura 8: Diagrama de blocos do sistema eletromecânico de acumulação de energia a desenvolver	8
Figura 9: Retificador trifásico de onda completa	13
Figura 10: Conversor redutor c.c.-c.c.	16
Figura 11: Circuito equivalente - modo 1 ($0 < t < t_{on}$)	17
Figura 12: Circuito equivalente - modo 2 ($t_{on} < t < T$)	18
Figura 13: Diagrama de blocos de um sistema de controlo do conversor c.c.-c.c. redutor	22
Figura 14: Diagrama simplificado do controlo em malha fechada.	23
Figura 15: Esquemático de uma célula eletroquímica.	25
Figura 16: Projeto final do sistema mecânico. Vista dimétrica superior	28
Figura 17: Projeto final do sistema mecânico a) Vista dimétrica esquerda b) Vista frontal	29
Figura 18: Mola em Espiral: a) Modelo 3D; b) Modelo real final	30
Figura 19: Fixador da mola a) Perspetiva geral. b) Detalhe do fixador da mola	31
Figura 20: Modelo 3D do Volante/Leme	31
Figura 21: a) Escada de engrenagens dimensionada b) Veios de acoplamento de engrenagens	32
Figura 22: a) Sistema de segurança - Desenho 3D b) Detalhe do sistema de segurança	33
Figura 23: Esquema elétrico da simulação, constituído por gerador, retificador trifásico em ponte, filtro LC conversor c.c.-c.c redutor. e bateria	35
Figura 24: Esquema elétrico com fonte trifásica e resistência	36
Figura 25: Esquema elétrico do subsistema do conversor redutor c.c.-c.c.	37
Figura 26: Formas de onda da corrente à saída da fonte trifásica, das diversas fases A, B e C	38
Figura 27: Forma de onda da tensão de saída entre as fases AB, CA, BC	39
Figura 28: Forma de onda da corrente à saída do retificador trifásico com efeito do filtro LC	40
Figura 29: Forma de onda da corrente à saída do retificador trifásico sem efeito do filtro LC a) entre 0 s e 0,3 s b) entre 0.1 s e 0.11 s	41
Figura 30: Forma de onda da tensão à saída do retificador trifásico com efeito do filtro LC ..	41
Figura 31: Forma de onda da corrente na carga, $R=1 \Omega$	42
Figura 32: Forma de onda da tensão na carga, $R=1 \Omega$	43
Figura 33: Esquema elétrico com fonte trifásica e bateria	43
Figura 34: Forma de onda da corrente na carga, após conversor redutor c.c.-c.c.	44
Figura 35: Forma de onda da tensão na carga, após conversor redutor c.c.-c.c.	45
Figura 36: Formas de onda da bateria 25 V	46
Figura 37: Formas de onda da carga para valores de 22 V na fonte	47
Figura 38: Formas de onda da carga para valores de 28 V na fonte	48

Figura 39: Esquema elétrico com gerador trifásico e resistência	49
Figura 40: Simulação do Permanent Magnet Synchronous Generator: PMSG.....	50
Figura 41: Forma de onda da corrente aos terminais do gerador – PMSG	50
Figura 42: Forma de onda da tensão aos terminais do gerador – PMSG	51
Figura 43: Forma de onda da corrente na carga, $R=1 \Omega$	52
Figura 44: Forma de onda da tensão na carga, $R=1 \Omega$	53
Figura 45: Forma de onda para a potência na carga, $R=1 \Omega$	53
Figura 46: Esquema elétrico com gerador trifásico e bateria	54
Figura 47: Formas de onda da corrente à saída do gerador trifásico	55
Figura 48: Forma de onda da tensão à saída do gerador	55
Figura 49: Formas de onda da bateria	56
Figura 50: Powerplus.....	58
Figura 51: Mola Espiral dimensionada para o projeto	58
Figura 52: Caixa da mola	58
Figura 53: DC-DC comercial	59
Figura 54: Three-phase Rectifier AC-DC Converter	59
Figura 55: DC-DC Converter	60
Figura 56: Pannel Fotovoltaico (PV) SW80 - 80W 12V Poli	60
Figura 57: Charge Controller Wellsee 12/24V 30A.....	60
Figura 58: DC-AC Converter, CONVERSOR 12VDC P/230VAC 600W	61
Figura 59: Layout final do projeto.....	62
Figura 60: Adequação a vários ambientes	63
Figura 61: Sistema constituído por biela-manivela a acionar mola, para movimento das correias e roldanas	69
Figura 62: Sistema constituído por rolamentos unidirecionais mecânicos a acionar molas mecânicas para movimento das correias e roldanas	69
Figura 63: Sistema constituído por biela manivela a acionar uma roda de inércia e um sistema das correias e roldanas	70
Figura 64: Esquema mola de espiral [31].....	71
Figura 65: Engrenagens. Representação convencional [31].....	71
Figura 66: Estrutura de suporte do sistema	74
Figura 67: Estrutura de suporte do sistema	74
Figura 68: Veios suporte da estrutura.....	76
Figura 69: Veios suporte da estrutura.....	76

Índice de Tabelas

Tabela 1: Dispositivos, cargas e potências necessárias respectivas, obtidas com o Wattímetro Digital	10
Tabela 2: Dispositivos, cargas e potências necessárias respectivas, obtidas com cálculos.....	10
Tabela 3: Geradores elétricos escolhidos do mercado e respectivas características	12
Tabela 4: Caracterização elétrica do retificador trifásico	14
Tabela 5: Resultados obtidos para o conversor c.c.-c.c redutor	21
Tabela 6: Caracterização da média de custos do projeto	27
Tabela 7: Dimensionamento do grupo de engrenagens.....	32
Tabela 8: Material Elétrico adquirido.....	57
Tabela 9: Custos reais dos equipamentos do projeto.....	61

Simbologia e Abreviaturas

Simbologia

S_{rpm} – Velocidade de rotação do gerador em rpm;

G_{\sim} - Gerador trifásico de ímãs permanentes, gerador CA;

V_{dc} – Tensão média de saída do retificador trifásico;

v_{bc} – Tensão entre fase b e c;

V_{ripple} – Tensão de *ripple* à saída do retificador trifásico;

V_{total} – Tensão total à saída do retificador trifásico (componente DC e *ripple*);

v_{rms} – Tensão eficaz do gerador;

f_r – Frequência fundamental da tensão de *ripple*;

α – Ângulo de disparo;

m – Número de fases ou pulsos gerados;

f_{ac} – Frequência proveniente do gerador;

I_{dc} - Corrente na carga R;

L – Indutância;

C – Condensador;

X – Reactância;

Z – Impedância;

I_{ripple} – Corrente de *ripple* à saída do retificador trifásico;

f - Frequência de comutação do conversor c.c.-c.c.;

f_c – Frequência de corte;

I_{out} – Corrente de saída do conversor c.c.-c.c. redutor;

D_i – Díodo de comutação;

I – Interruptor;

t_{on} – Tempo de funcionamento do interruptor do conversor c.c.-c.c.;

V_{in} - Tensão de entrada no conversor c.c.-c.c. redutor;

V_{out} - Tensão de saída do conversor c.c.-c.c. redutor;

V_L – Tensão na indutância;

I_L – Corrente na indutância;

ΔI - Ondulação de corrente da indutância, pico-a-pico;

T - Período de comutação do conversor c.c.-c.c.;

t_{off} - Tempo em que o interruptor do conversor c.c.-c.c. está desligado;

D - Ciclo de trabalho do conversor c.c.-c.c. redutor;

T_{vv} - Relação de transferência de tensão;

I_{in} - Corrente de entrada no conversor c.c.-c.c. redutor;

ΔV_c - Ondulação de tensão do condensador, pico-a-pico;

$V_{ref}(s)$ - Valor de referência do sistema de controlo em malha fechada;

$e(s)$ - Erro do sistema de controlo em malha fechada;

V_{ctrl} - Tensão de controlo do sistema de controlo em malha fechada;

$H(s)$ - Ganho em malha fechada;

$G(s)$ - Ganho em malha aberta;

i - Relação de transmissão;

n_a - Número de dentes da roda a;

n_b - Número de dentes da roda b;

w_a - Velocidade de rotação roda a;

w_b - Velocidade de rotação roda b;

V_{pp} - Tensão pico-a-pico à saída do gerador;

V_{ef} - Valor eficaz do gerador/fonte trifásica;

$V.s$ - Ligação entre ímanes no gerador de ímanes permanentes;

$S_{rad/s}$ - Velocidade de rotação do gerador em rad/s;

Abreviaturas

DGEG – Direcção-Geral de Energia e Geologia;

rad/s – radianos por segundo;

rpm – rotações por minuto;

PWM – Pulse-Width Modulation;

c.a. – Corrente alternada;

c.c. – Corrente contínua;

SOC – State of Charge;

USB - Universal Serial Bus;

CA – Corrente Alternada;

CC – Corrente Contínua;

FV – Fotovoltaico;

UPS – Uninterruptible power supply;

IAPMEI – Agência para a Competitividade e Inovação, I.P..

Capítulo 1 - Introdução

1.1. Enquadramento do tema

Pretende-se com este trabalho apresentar uma solução ecológica de produção de energia elétrica para alimentação de dispositivos eletrônicos de baixa potência, para colocação em ambientes urbanos, que podem ser *indoor* ou *outdoor*.

Ao longo do desenvolvimento deste projeto foi feita a análise da conceção de uma estação/plataforma física móvel destinada à alimentação de dispositivos eletrônicos através de um sistema inovador de produção de energia com múltiplas fontes, tais como mola, pedais e painel fotovoltaico, portanto o estudo realizado compila a união de múltiplas fontes para produção de energia elétrica.

O trabalho desenvolvido passou pela caracterização mecânica do projeto. De seguida, foi balizada a gama de funcionamento do sistema, tendo em consideração as necessidades energéticas dos dispositivos eletrônicos, sendo de seguida feita uma seleção de material do mercado adequada ao estudo feito. O passo seguinte passou por utilizar alguns dos valores dos equipamentos de mercado como referencia para o estudo de eletrónica de potência e por seguinte nas simulações em ambiente computacional – *MatLab*. Ao longo das diversas etapas desenvolvidas foi possível identificar dificuldades e pontos críticos que não permitiram obter conclusões acerca da assemblagem de todo o sistema, e por isso não foi possível traduzir computacionalmente a caracterização mecânica, assim como a assemblagem total do sistema. Não obstante de todas as dificuldades foi possível a definição das atividades a desenvolver em passos futuros sendo estas descritas no Capítulo 7.3 - Proposta de trabalhos futuros.

Os dispositivos eletrônicos mencionados anteriormente poderão dizer respeito a telemóveis/*smartphones*, computadores/*laptops*, *tablets*, *etc* como se pode ver na próxima Figura 1 e correspondem a dispositivos de baixa potência. Estes dispositivos de baixa potência dependem das suas baterias para funcionarem. Em maior parte dos casos, estes dispositivos tem baterias de pequenas dimensões o que implica pequena capacidade de armazenamento de energia. Adicionalmente, as suas funcionalidades tem aumentado acumulando diversas funções tais como comunicação de voz, reprodução áudio e vídeo, navegação na *internet*, envio de SMS e *email*, jogos, entre outras. Desta forma, torna-se crítico a ótima gestão do consumo de energia, que depende de quais partes do sistema estão a consumir, em que circunstâncias.

A constituição do *hardware* dos dispositivos eletrônicos é variada, no entanto em todos se destacam alguns componentes como processador, vídeo e interface de rede como os maiores consumidores da energia disponível [1].



Figura 1: Dispositivos eletrônicos de baixa potência [2]

A plataforma desenhada neste projeto pode ser chamada de eco plataforma, para amantes de desportos e novas tecnologias, uma vez que não recorre à rede de energia elétrica para a alimentação de dispositivos, mas sim à energia disponibilizada por um utilizador, que esteja disposto a realizar alguma atividade física.

Em termos práticos, uma plataforma com estas características terá distinta utilidade, quando instalada em locais cuja energia elétrica não está facilmente acessível, isto é, parques de campismo, praias, parques naturais, festivais, centros comerciais, entre outros. Todos os locais anteriormente mencionados acolhem utilizadores em períodos de lazer em família e não só. Por isso estarão aptos e disponíveis para durante um determinado período e através de alguma atividade física acionar o equipamento. Dessa forma, poderão alimentar dispositivos elétricos que tragam consigo e que estejam sem energia elétrica armazenada.

Além disso, detém uma componente social e de responsabilidade ambiental inerente ao projeto, relacionada com a instrução da consciência da sociedade para o valor da energia elétrica. Podemos assim usufruir das vantagens da tecnologia atual sem agravarmos em determinado aspeto a pegada ecológica.

No passado, surgiram equipamentos que, através de energia cinética ou potencial, geravam energia elétrica para funcionar. São exemplos disso, rádios, ilustrado na Figura 2, e lanternas, ambos à manivela. Estes equipamentos foram desenvolvidos para que fosse possível existir algum tipo de energia quando as tradicionais fontes de energia estavam indisponíveis. Dada a sua funcionalidade, vulgarmente eram chamados de *emergency power source* ou *hand-cranked equipment*. De uma forma geral, estes equipamentos têm um gerador que converte energia mecânica em energia elétrica cada vez que é provocada uma rotação. Em muitas situações são constituídos por um painel fotovoltaico para auxiliar na produção de energia em ambiente *outdoor* [3] [4].



Figura 2: Rádio à manivela [5]

Outro equipamento baseado no mesmo princípio de funcionamento é a bicicleta com dínamo, exemplo ilustrado na Figura 3. De uma forma simples, através da rotação dos pneus da bicicleta, será provocado um movimento sobre o eixo do gerador que produz uma força mecânica. Esta força gera um campo magnético que leva à produção de energia elétrica. O nível de energia que um ser humano consegue produzir ao pedalar depende muito da sua capacidade e preparação física. Uma pessoa saudável que realiza desporto regularmente pode produzir até aproximadamente 150 W, enquanto uma pessoa menos desenvolvida em termos físicos e com menor preparação física pode produzir até 50 W [6].



Figura 3: Bicicleta acoplada a dínamo [7]

Mais recentemente, com base no mesmo princípio de funcionamento, têm aparecido vários produtos capazes de responder de forma simples a necessidades já conhecidas em larga escala.

No mercado global atual existem soluções que vão ao encontro das características abordadas anteriormente. *We Watt: Pure Human Power* é um exemplo disso, Figura 4 cuja solução passa por utilizar pedais para a produção de energia elétrica para alimentação de dispositivos eletrônicos de baixa potência. Atualmente está instalado maioritariamente em aeroportos da Europa Central.

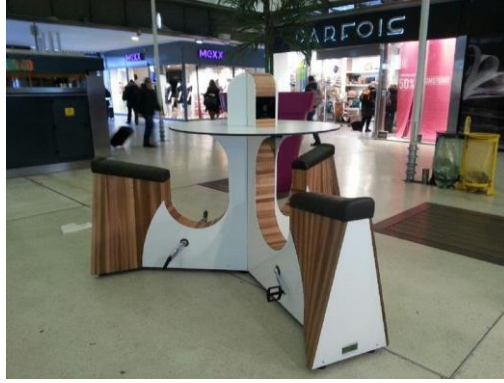


Figura 4: We watt: Pure Human Power [8]

De outra forma, mas também através da atividade física humana, existe a produção de energia recorrendo a pavimentos piezoelétricos, que através da pressão mecânica aplicada no local, produz uma carga negativa e positiva. Quando a pressão é aliviada, a carga (corrente) elétrica flui. A energia gerada pelas células piezoelétricas antes de ser armazenada passa por uma etapa de retificação e outra de filtragem. A energia produzida por uma simples célula é relativamente pequena, e por isso é preciso utilizar várias para que a energia se torne considerável para armazenar.

Existe um “*Dance club*” nomeado de “*Watt*” em Roterdão, Holanda, cujo um dos pisos recorre a esta tecnologia para produção de energia elétrica, disponibilizando energia para alimentar circuitos de baixa potência da instalação do edifício, ilustrado na próxima Figura 5. Dependendo do peso ou movimentos efetuados, uma pessoa a dançar consegue produzir entre 5 W e 10 W [9].



Figura 5: Pavimento Piezoelétrico – Discoteca “Watt”, Holanda [10]

Relacionado também com a atividade física tem vindo a surgir ginásios sustentáveis em vários locais do mundo, com diversas melhorias e evoluções entre eles. Um exemplo está em Bristol,

Inglaterra, Figura 6. O ginásio foi reequipado com aparelhos capazes de utilizar o exercício feito pelos utilizadores, e assim colocar em funcionamento a eletrónica e ecrãs dos equipamentos. No caso de a produção ser em maiores quantidades, fornece energia à instalação elétrica do edifício.



Figura 6: Ginásio auto-sustentável, Inglaterra [11]

A mais recente inovação relacionada com os princípios anteriores é um sapato cuja sola produz energia elétrica à medida que se caminha, ilustração na Figura 7. Este produto ainda não está no mercado, mas já é possível efetuar reservas. A sola é ativada pela força do nosso passo, a cada passada. Essa energia aciona um gerador, após isso é enviada para uma bateria colada a um dos lados do sapato e pode ser utilizada através de um cabo USB.



Figura 7: Sapato com sola produtora de energia elétrica [12]

Vão surgindo as mais diversas soluções para um problema atual, uma vez que a dependência dos *gadgets* e suas aplicações tem aumentado, contudo as capacidades de armazenamento de energia tem-se mantido.

O que se pretende com o projeto de um sistema eletromecânico de acumulação de energia, é desenvolver um equipamento que através do movimento humano impulsionado por um volante,

pedais ou painel solar produza energia elétrica suficiente para alimentar diversos dispositivos eletrônicos de baixa potência simultaneamente, como telemóveis, *smartphones*, máquinas fotográficas digitais, entre outros.

1.2. Motivação

O progressivo desenvolvimento da sociedade em termos tecnológicos tem acarretado consigo diversas necessidades sob o ponto de vista da eficiência energética. O consumo energético vislumbra-se uma preocupação e para a redução do mesmo é fundamental a existência de medidas organizacionais e governamentais efetivas.

O crescente desenvolvimento dos dispositivos móveis leva à necessidade que estes sejam cada vez mais eficientes, de forma a pudermos usufruir de todas as suas aplicações. Uma vez que a resposta em termos de desenvolvimento dos sistemas de armazenamento de energia – baterias – ainda não acompanha o restante avanço da tecnologia, é preciso procurar respostas paralelas, para que se possa usufruir de todas as vantagens que nos são oferecidas pelos diversos dispositivos eletrônicos existentes.

Este trabalho de projeto, desenvolvido no âmbito do Mestrado de Engenharia Eletrotécnica – Ramo de Automação e Comunicação em Sistemas de Energia, surgiu como resposta a essa necessidade encontrada. Por outras palavras, com o trabalho desenvolvido foi procurado responder ao problema da falta de capacidade dos atuais dispositivos eletrônicos, que nos podem proporcionar as mais variadas atividades, no entanto estão limitados pelos seus sistemas de armazenamento de energia elétrica.

Não é demais lembrar que devido a dificuldades e adversidades, algumas conclusões ficaram por finalizar, tais como a análise via *MatLab* dos componentes mecânicos, e a integração final de todo o sistema. Desta forma, é deixada uma porta aberta para o desenvolvimento de trabalhos futuros que podem culminar num projeto motivante e desafiante, uma vez que já são conhecidas as variáveis envolvidas.

1.3. Objetivos e Metodologia de Trabalho

Nas próximas páginas é apresentado todo o percurso do desenvolvimento do projeto que após sucessivos e iterativos estudos e dimensionamentos levaram a ajustes até se atingir a solução final. Foi necessário também o estudo de componentes mecânicos, imprescindíveis na composição do projeto.

Adicionalmente foi necessário determinar detalhadamente a forma de atuar, analisando por etapas todos os parâmetros de entrada e saída, ou seja, níveis de tensão e corrente nos diversos estágios do circuito do projeto. Dessa forma, obtivemos o estudo do projeto em termos elétricos. Para garantir a efetividade do conjunto dos estudos elaborados foram feitas simulações

computacionais, através do *SIMULINK - MatLab*. Um modelo computacional é a representação da teórica estudada que pode ser prevista e controlada, fácil de manipular.

Fazendo uma descrição mais detalhada, o primeiro passo passou pela caracterização mecânica do sistema envolvido, isto é, quais os elementos mecânicos mais adequados para o objetivo do projeto e respetivo funcionamento. Após isso, foram definidos os parâmetros de funcionamento em termos elétricos, este estudo teve em consideração as necessidades de consumo dos dispositivos elétricos que se pretende alimentar com a plataforma objeto de estudo. Após esta análise, e mediante a experiência tida foi selecionado do mercado determinados componentes e equipamentos que se ajustaram às necessidades. Para a análise teórica que se seguiu foi tida em consideração determinados valores obtidos nas *datasheets* dos equipamentos. Após a análise teórica foi feita uma validação dos diversos componentes através do *MatLab*.

No ponto seguinte, 1.4. é feita uma descrição sucinta da estrutura do documento.

1.4. Estrutura do Documento

A organização deste documento está elaborada da seguinte forma:

- Capítulo 1 corresponde à introdução do tema. Neste capítulo é feito o enquadramento do tema, descrição da motivação, assim como objetivos e metodologias abordadas.
- Capítulo 2 aborda a descrição da arquitetura do sistema.
- Capítulo 3 caracteriza o sistema a desenvolver sob o ponto de vista elétrico.
- Capítulo 4 descreve os estudos mecânicos inerentes ao funcionamento do sistema, sendo detalhadamente auxiliado pelos Anexos I e II.
- Capítulo 5 apresenta a solução sob o ponto de vista de simulações computacionais do sistema em detalhe para cada bloco, através do programa computacional *SIMULINK-MatLab*.
- Capítulo 6 descreve o equipamento adquirido para implementação do sistema.
- Capítulo 7 exhibe a viabilidade do projeto, conclusões do trabalho elaborado e proposta para trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Descritivo do projeto

Neste capítulo é feita a descrição da arquitetura do projeto através da demonstração do diagrama de blocos de funcionamento associado ao projeto. Adicionalmente é possível entender quais os parâmetros de funcionamento a jusante e a montante envolvidos.

Este capítulo é de forma sucinta uma caracterização geral do projeto descrito no documento a seguir.

2.1. Descrição da arquitetura do sistema

O trabalho elaborado para este projeto constitui o estudo integral de um sistema de acumulação de energia elétrica produzida por diversas fontes, que se traduz basicamente num sistema híbrido com três diferentes formas de produção de energia elétrica, pedais, mola e painel fotovoltaico. Na Figura 8, está ilustrado o diagrama de blocos que se pretende desenvolver. Para melhor compreensão da imagem, o retângulo a verde corresponde ao sistema dimensionado de molas. A laranja está o sistema comercial adquirido que diz respeito ao painel fotovoltaico. A azul encontra-se o sistema de pedais, também adquirido do mercado.

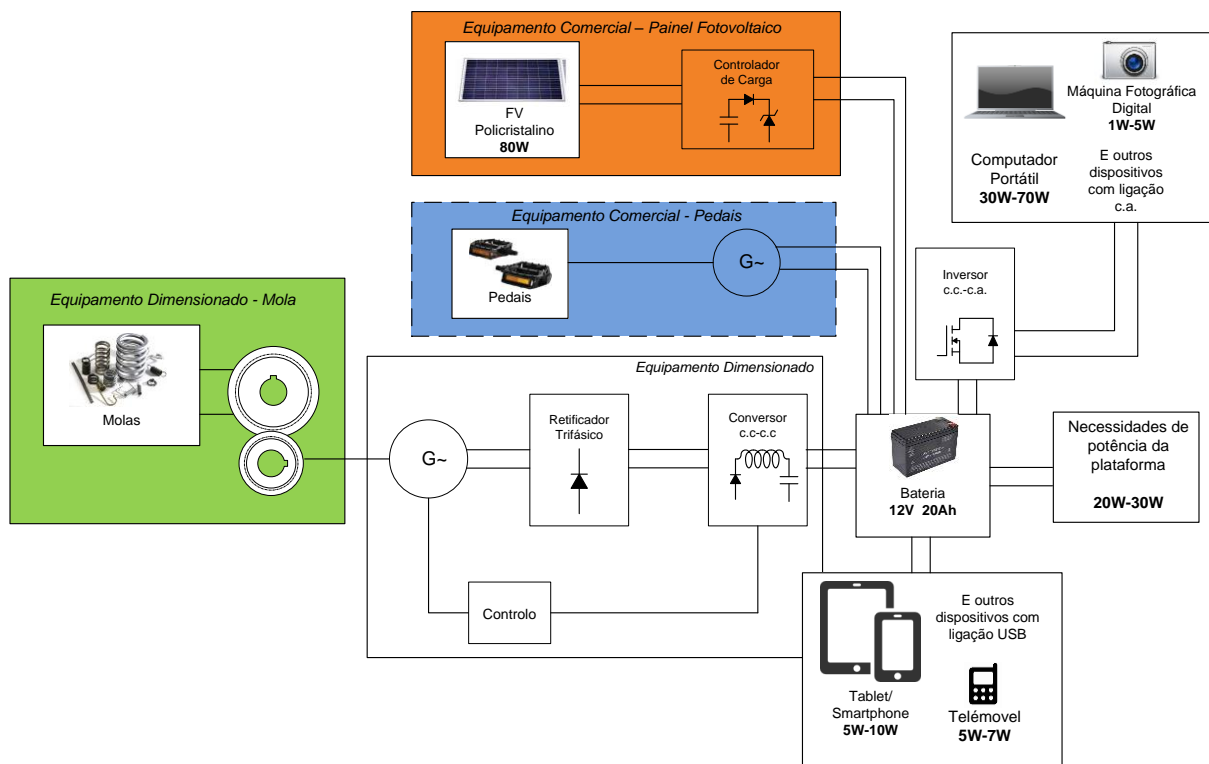


Figura 8: Diagrama de blocos do sistema eletromecânico de acumulação de energia a desenvolver

A produção de energia mecânica é conseguida por via de uma mola mecânica agrupada a um sistema de desmultiplicação de engrenagens acopladas a um gerador de ímanes permanentes de baixa rotação, isto é, rotação máxima de 600-700 rpm, identificado na figura como G~. Além desta fonte de energia mecânica existe outra, ilustrada na Figura 8 como pedais diretamente acoplados a um gerador. Além das anteriores mencionadas, também possível de ver na Figura 8, existe produção de energia elétrica através de um painel fotovoltaico.

O gerador trifásico de ímanes permanentes definido para o projeto tem uma potência nominal de 400 W, e tensão nominal de 36 V (c.a.). Esta decisão foi tomada com base na análise dos equipamentos existentes no mercado para aquisição.

Para obtenção dos valores finais capazes de satisfazer as necessidades do sistema, é preciso uma implementação adequada de eletrónica de potência. Dessa forma, é colocado um retificador trifásico que converte a corrente alternada em corrente contínua, e para estabilizar o sistema é implementado um conversor c.c.-c.c. redutor, que de seguida está conectado à bateria.

Paralelamente ao sistema, existe a solução comercial constituída pelo painel fotovoltaico policristalino e com potência máxima de 80 W. A regulação da carga vinda do painel é garantida por um controlador de carga que liga diretamente à bateria. Este controlador de carga efetua a gestão de carga de modo a obter os perfis compatíveis com a radiação disponível e com a capacidade das baterias.

Uma vez que o sistema tem diversas possibilidades de distribuir a potência desenvolvida, a bateria tem três *outputs* distintos. Uma das hipóteses será acoplar a bateria a um conversor c.c.-c.a. e dessa forma alimentar dispositivos com necessidades de corrente alternada, com disponibilização externa de uma ficha CA correspondente. Para dispositivos com ligação USB serão também disponibilizadas as fichas correspondentes, atualmente normalizadas para mini USB e micro USB. A energia produzida terá como objetivo também alimentar os dispositivos da plataforma, que podem ser *tablet*, *router*, entre outros, e para estes as ligações serão internas sem disponibilização ao utilizador.

Após analisadas as necessidades do sistema, descritas na próxima Tabela 1, foi possível concluir que a potência necessária a desenvolver pelo sistema eletromecânico deverá ser no mínimo 6 W (c.c.) e no máximo 140 W (c.c.), para ser possível satisfazer ao mesmo tempo todas as necessidades de potência absorvidas pelos equipamentos que nos propomos alimentar. A análise feita foi baseada nas necessidades de consumo de cada dispositivo, quando estes estão ligados à corrente. Para obtenção dos valores de energia/potência necessária ao sistema para alimentação dos dispositivos eletrónicos, expostos na Tabela 1, foi utilizado um Wattímetro digital. Através do mesmo foi possível perceber que as potências exigidas para alimentar os dispositivos variam consoante a carga inicial existente e o tempo de vida do dispositivo.

Tabela 1: Dispositivos, cargas e potências necessárias respectivas, obtidas com o Wattímetro Digital

Dispositivos e estado de carga da bateria	Potência absorvida (W)
Computador a ser alimentado, (Carga da bateria > 20%; bateria em fim de vida):	37
Computador a ser carregado (Carga da bateria < 5%; bateria em fim de vida):	50
Computador a ser alimentado, (Carga da bateria > 20%; bateria a meia vida):	22
Computador a ser carregado, (Carga da bateria < 5%, bateria em fim de vida):	65
<i>Smartphone</i> (37% de carga na bateria)	5,3

As restantes potências, correspondentes aos diversos equipamentos inerentes à plataforma, foram calculados, sendo apresentados na Tabela 2. Os valores obtidos foram baseados nas especificações técnicas dos equipamentos disponíveis para aquisição.

Tabela 2: Dispositivos, cargas e potências necessárias respectivas, obtidas com cálculos

Dispositivos e estado da carga da bateria	Potência absorvida (W)
LCD (monitor tátil com driver incorporado)	20
<i>Router</i>	30
Máquina Fotográfica Sony® (Com <i>Battery Charger</i>)	1,05

Este projeto teve como princípio a preocupação com as necessidades de consumos energéticos. A dependência atual dos *gadgets* à nossa disposição exige respostas no que toca ao fornecimento de energia que antes nunca haviam sido colocadas.

Capítulo 3 – Caracterização elétrica do sistema

Os passos iniciais do projeto da plataforma passaram pela definição da potência necessária a produzir pelo sistema, 140 W (c.c.) e de seguida pelo dimensionamento da mola e estudos mecânicos associados. Ainda nesta fase inicial, foram considerados os diâmetros do volante giratório para acionar a rotação, o diâmetro e força indispensável no veio do volante, a necessidade de existir uma embraiagem unidirecional, a caixa de desmultiplicação via engrenagens ou outros componentes mecânicos. Todas as questões mecânicas consideradas e analisadas ao detalhe para conceber o projeto-piloto são explicadas no Capítulo 4.

A Figura 8 ilustra o diagrama de blocos de auxílio no desenvolvimento do projeto, sendo que todos os cálculos e dimensionamentos nela estão baseados. Facilmente se constata que a conjectura do projeto implica o envolvimento entre uma componente mecânica e uma componente elétrica.

Não foi possível traduzir integralmente o diagrama de blocos da Figura 8 num esquema de ligações, pelo que algumas conclusões ficaram por apurar.

3.1. Gerador de ímanes permanentes

A decisão da escolha de um gerador de ímanes permanentes para utilização no projeto recai no facto de este ter inúmeras vantagens. O seu desenvolvimento deve-se à constante evolução no estudo de novos materiais magnéticos, nomeadamente, materiais à base de terras raras como por exemplo o neodímio-ferro-boro.

As vantagens existentes na utilização de um gerador de ímanes permanentes são: 1) dado a inexistência de anéis e escovas de contacto, a fiabilidade é maior, por consequência menores custos de manutenção, além de terem um maior rendimento; 2) pelo facto de não existirem enrolamentos condutores não existem perdas no enrolamento de excitação do rotor. Apenas existem perdas por efeito de Joule no enrolamento estatórico; 3) devido à redução no número de perdas, o rendimento da máquina é incrementado e consequentemente, pode-se oferecer uma solução com peso e volume menor que uma máquina convencional, alargando a gama de utilização; 4) os ímanes não apresentam limitação para geração de potência, porém podem em determinadas circunstâncias traduzirem-se em preços muito elevados [13].

Este tipo de máquinas utilizam-se normalmente em sistemas cuja velocidade é variável, tal como se caracteriza este projeto, e entre as diversas aplicações as que mais se destacam são: robótica, indústria automóvel, indústria têxtil, papel e vidro, aplicações militares e aeroespaciais e energias renováveis.

Do ponto de vista funcional, as máquinas síncronas de ímanes permanentes são máquinas elétricas em muito semelhantes às máquinas convencionais onde no lugar dos enrolamentos do rotor estão ímanes permanentes de alta eficiência energética.

Antes da decisão final do gerador c.a. trifásico de ímanes permanentes a usar, foi necessário efetuar uma seleção inicial de equipamentos existentes no mercado. Através das tensões e potências nominais foram calculados diversos níveis de tensão do circuito, nas diversas opções existentes, conforme se apresenta na Tabela 3. Os dados partilhados nesta tabela correspondem aos dados fornecidos nas especificações técnicas de venda. Nesta tabela não foi considerada a velocidade nominal, por não ser necessária para os cálculos seguintes, no entanto e por ser um gerador de baixa rotação, a velocidade nominal, S_{rpm} , dos mesmos é de 600 rpm, o que corresponde ao objetivo inicial proposto.

Tabela 3: Geradores elétricos escolhidos do mercado e respetivas características

Gerador elétrico	Características		
Opção 1: + controlador de carga	Tensão Nominal: 24 V c.c.	Potência Nominal: 600 W	Corrente Nominal: 25 A
Opção 2	Tensão Nominal: 36 V c.a.	Potência Nominal: 400 W	Corrente Nominal: 11,11 A
Opção 3	Tensão Nominal: 64 V c.a.	Potência Nominal: 600 W	Corrente Nominal: 29 A

3.2. Retificador trifásico de onda completa

Após caracterização dos diversos geradores, conforme a Tabela 3, foi possível prosseguir para a análise do nível seguinte do diagrama de blocos ilustrado na Figura 8 correspondente a um retificador trifásico em ponte cujo gerador de ímanes permanentes está acoplado. Para o projeto foi tida em consideração a tipologia necessária: um retificador trifásico em ponte, uma vez que o gerador é trifásico. O retificador recebe a energia do gerador em corrente alternada e transfere-a para uma carga de corrente contínua, com uma componente de *ripple* bastante reduzida, dada a configuração do retificador. Este caracteriza-se por ser um retificador de onda completa, gerando uma ondulação com seis pulsos, que permite produzir à saída uma tensão igual ao máximo instantâneo do valor absoluto das três tensões de linha. A numeração dos díodos na Figura 9 é feita consoante a ordem de condução sendo esta uma ordem crescente.

Através da análise bibliográfica existente para o efeito, foi possível deduzir as equações para obter a caracterização elétrica da carga resistiva R , cujo valor é 10Ω . A tensão na carga apresenta seis pulsos por ciclo. A mesma é obtida usando o método dos estados assumidos e supondo que os díodos são iguais.

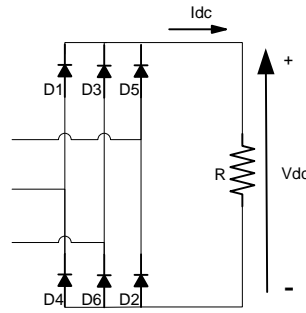


Figura 9: Retificador trifásico de onda completa

O valor de tensão à saída do retificador com a tipologia anteriormente indicada, Figura 9, pode ser obtido através da próxima equação (Eq.1) [14]. Esta traduz a tensão média CC de saída, ou seja a integração de 1/6 de um ciclo da tensão entre as fases b e c, v_{bc} , do gerador e, v_{rms} , valor eficaz da tensão de linha.

$$\begin{aligned}
 V_{dc} &= \frac{3\omega}{\pi} * \int_0^{\frac{\pi}{3\omega}} -v_{bc}(t) d(t) & \text{(Eq.1)} \\
 &= -\frac{3\omega}{\pi} * \int_0^{\frac{\pi}{3\omega}} \sqrt{2} * v_{rms} * \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) dt \\
 &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} * v_{rms}
 \end{aligned}$$

A tensão de *ripple* calcula-se através da próxima equação (Eq.2) [15], onde V_{dc} é a componente CC máxima da tensão de saída, determinada na equação (Eq.1). V_{ripple} é o valor que pretendemos encontrar e V_{total} é a tensão total à saída do retificador. Todas as componentes de tensão dizem respeito a valores eficazes.

$$\begin{aligned}
 V_{dc}^2 + V_{ripple}^2 &= V_{total}^2 & \text{(Eq.2)} \\
 V_{ripple} &= \sqrt{V_{dc}^2 - V_{total}^2}
 \end{aligned}$$

V_{total} pode ser determinado através da próxima equação (Eq.3) [15], sendo m o número de fases ou pulsos gerados do circuito. Neste caso em concreto por ser um retificador trifásico em ponte, m é igual a 6, uma vez que a ondulação é gerada em seis pulsos. A variável α corresponde ao ângulo de disparo que nesta situação em tem valor 0, uma vez que o componente utilizado é o diodo e não o tiristor ou outro componente que recorre ao disparo para atuar.

$$V_{total} = V_{rms} * \left(1 + \frac{\sin(2\pi/m)}{2\pi/m} * \cos 2\alpha \right)^{1/2} \quad (\text{Eq.3})$$

$$V_{total} = V_{rms} * 0,9135$$

A frequência fundamental da tensão *ripple* determina-se através da equação (Eq.4) [15], onde f_{ac} é a frequência proveniente do gerador, 50 Hz.

$$f_r = m * f_{ac} \quad (\text{Eq.4})$$

Para a determinação da corrente de saída do retificador foi considerada apenas a componente CC, uma vez que a tipologia apresentada permite que valores de *ripple* sejam bastante reduzidos (não nulos) em comparação com outras tipologias. Foi considerada uma carga puramente resistiva. Pela Lei de Ohm, a corrente de saída pode ser obtida como descrito em baixo na equação (Eq.5):

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} \quad (\text{Eq.5})$$

Após cálculos efetuados, baseados nas equações descritas anteriormente, foi possível obter os dados da Tabela 4, cuja informação influenciará na determinação dos restantes níveis de tensão do sistema.

Tabela 4: Caracterização elétrica do retificador trifásico

Gerador elétrico	Caracterização elétrica do retificador		
Opção 1: + controlador de carga	$V_{dc} = 24 \text{ V c.c.}$	-	$I_{dc} = 2,4 \text{ A c.c.}$
Opção 2	$V_{rms} = 36 \text{ V c.a.}$ $V_{dc} = 48,6 \text{ V c.c.}$	$V_{ripple} = 35,8 \text{ V}$	$I_{dc} = 4,9 \text{ A c.c.}$
Opção 3	$V_{rms} = 64 \text{ V c.a.}$ $V_{dc} = 86,43 \text{ V c.c.}$	$V_{ripple} = 63,65 \text{ V}$	$I_{dc} = 8,6 \text{ A c.c.}$

3.3. Filtro LC

A colocação de um filtro a jusante do retificador trifásico irá melhorar consideravelmente as formas de onda da tensão e da corrente à saída deste, uma vez que o filtro rejeita oscilações e ruídos indesejados. De forma semelhante irá atuar positivamente na entrada no conversor c.c.-c.c. redutor, nível seguinte do diagrama funcional de blocos.

Com este filtro será possível fornecer ao conversor uma corrente pico-a-pico com valores admissíveis para o seu funcionamento. O dimensionamento de L , deve ter em consideração que irá atuar sobre a oscilação da corrente, enquanto C , terá influencia diretamente na oscilação da tensão. Assim, a combinação de L com C permite uma estabilidade adequada das formas de onda.

Para a implementação de um filtro LC, será necessário retirar alguns dados da análise feita anteriormente, e substituí-los na equação (Eq.6) [15]. Com esta equação determino a indutância.

$$L = \frac{X}{2\pi * f_r} \quad (\text{Eq.6})$$

Através da equação (Eq.7) [15], determino a Reactância, enquanto através da (Eq.8), baseada na Lei de Ohm, determino a Impedância. Estes valores devem ser considerados, uma vez que a jusante do retificador, idealmente deveria existir era uma carga puramente resistiva, no entanto não acontece na realidade. A determinação destes valores permite o dimensionamento adequado do circuito.

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (\text{Eq.7})$$

$$Z = \frac{V_{ripple}}{I_{ripple}} \quad (\text{Eq.8})$$

Para esta determinação foi necessário considerar um valor para a corrente de *ripple*, I_{ripple} , que idealmente é a mais pequena possível, por exemplo 0,5 A.

Assim, calculamos o valor de L que pode ser 0,0376 H ou 0,0673 H consoante a opção escolhida (2 ou 3 da Tabela 4).

Para determinação de C , foi tida em consideração a seguinte equação (Eq.9) [16], ou seja, a frequência ressonante deve ser substancialmente inferior à frequência de *ripple*.

$$\frac{1}{\sqrt{LC}} \ll f_r \quad (\text{Eq.9})$$

Como $f_r=300$ Hz e L pode ter valores entre 0,0376 H e 0,0673 H, se C tiver o valor de $55e-4$ F, esta expressão será verdadeira, para ambos valores de indutância.

Dada a instabilidade das formas de onda, a determinação deste filtro ajuda a melhorar as ondas à saída do retificador e dessa forma melhora a estabilidade do circuito em geral.

3.4. Conversor redutor c.c.-c.c.

Ao continuar a análise da Figura 8, constata-se que o nível seguinte se trata do conversor redutor c.c.-c.c, Figura 10, para o qual foi considerada a bibliografia [16], [17], [18] e [19]. Este converte uma tensão contínua, noutra tensão contínua, no entanto de valor inferior, ou seja, será usado como interface entre dois níveis de tensão, num circuito de corrente contínua. Em termos práticos traduz-se na redução de 50 V (c.c.) para 15 V (c.c.). O decréscimo deste valor de tensão c.c. justifica-se, porque apenas assim é possível carregar uma bateria de gel de 12 V. A partir deste ponto de desenvolvimento da caracterização do sistema, não foi considerada a opção 1 nem a opção 3 da Tabela 3.

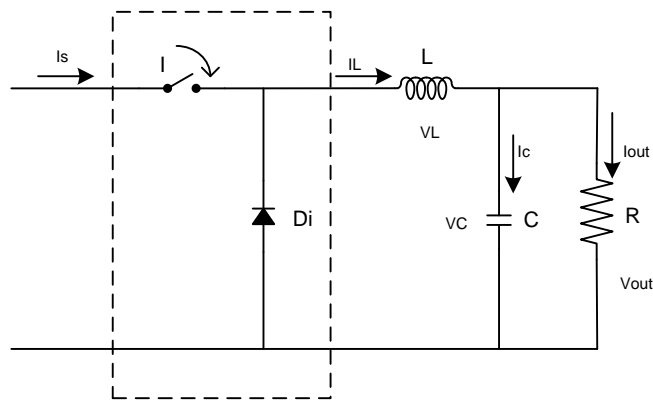


Figura 10: Conversor redutor c.c.-c.c.

No conversor redutor c.c.-c.c do anglicismo *Buck Converter*, a tensão média de entrada é maior que a tensão média de saída. É preciso ter em consideração que a redução do nível de tensão no circuito se traduz num aumento do nível de corrente, uma vez que a potência de entrada deve coincidir com a potência de saída.

O conversor da Figura 10, envolvido pelo retângulo a tracejado, deverá ser controlado, através de um controlo PWM, que se caracteriza por ter uma frequência de comutação constante, f , que varia entre kHz e algumas centenas de kHz, para assim estabilizar o nível de tensão à saída do conversor, isto é, na bateria. [18]

A operação do circuito pode ser dividida em dois modos: considerando a Figura 10, o modo 1, representado na Figura 11, inicia quando o interruptor I é acionado, e a corrente flui crescente através da indutância L, do condensador C e da resistência de carga R. Este interruptor deve ter a capacidade de ligar e desligar através de um sinal de controlo, assim como ser capaz de ao mesmo tempo deixar fluir a corrente e impedir a passagem de I_{out} . O modo 2 inicia quando o interruptor I é desligado e por isso entra em funcionamento o díodo de comutação D, fluindo a energia através de L, C e carga R, como ilustrado na Figura 12. O modo 2 termina quando o interruptor, I, é ligado novamente. O díodo de comutação que pode ser também considerado um interruptor deve ser capaz de conduzir I_{out} e impedir a corrente inversa.

Para análise do funcionamento do conversor redutor, facilita a compreensão dividindo a análise nos dois modos descritos anteriormente.

O modo 1 corresponde ao intervalo de tempo entre 0 e t_{on} ($0 < t < t_{on}$), ou seja, tempo durante o qual o interruptor I está acionado. Caracteriza-se por ser um armazenamento de energia magnética na indutância. O circuito equivalente está ilustrado na Figura 11.

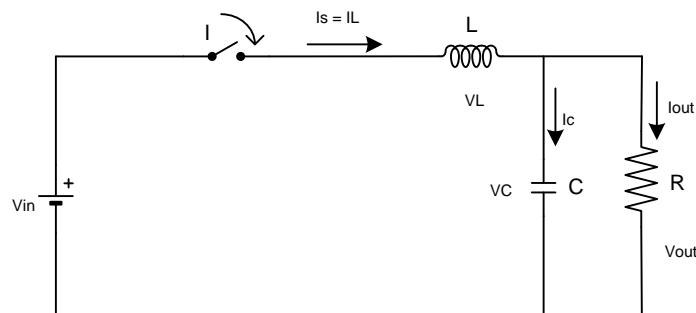


Figura 11: Circuito equivalente - modo 1 ($0 < t < t_{on}$)

Desde que a tensão de entrada, V_{in} , seja maior que a tensão de saída V_{out} , a corrente na indutância irá aumentar. A tensão através da indutância L, V_L , traduz-se pela equação (Eq.10) [20]:

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad (\text{Eq.10})$$

Quando analisado o circuito equivalente, a tensão na indutância é a diferença entre a tensão de entrada, V_{in} , e tensão de saída, V_{out} , através da seguinte equação (Eq.11) [20].

$$\begin{aligned} V_{in} - V_{out} &= L \frac{I_2 - I_1}{t_{on}} \\ &= L \frac{\Delta I}{t_{on}} \end{aligned} \quad (\text{Eq.11})$$

O tempo de duração do modo 1 traduz-se pela equação (Eq.12) [20]:

$$t_{on} = \frac{L\Delta I}{V_{in} - V_{out}} \quad (\text{Eq.12})$$

O modo 2 inicia quando o interruptor é desligado e corresponde ao intervalo de tempo ($t_{on} < t < T$). Neste modo a corrente na indutância diminui, assim como a energia por ela armazenada, que passa a ser transferida para o condensador e resistência de carga. O circuito equivalente está ilustrado na Figura 12.

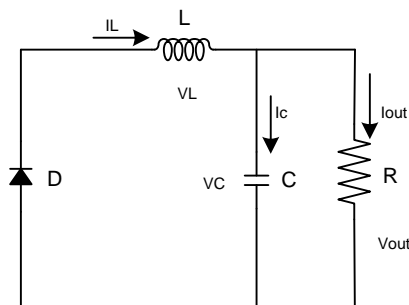


Figura 12: Circuito equivalente - modo 2 ($t_{on} < t < T$)

A tensão na indutância traduz-se agora pela equação (Eq.13) [20]:

$$\begin{aligned} -V_{out} &= L \frac{I_2 - I_1}{t_{off}} \\ V_{out} &= L \frac{\Delta I}{t_{off}} \end{aligned} \quad (\text{Eq.13})$$

O período de comutação, T , que diz respeito ao tempo cujo interruptor I está em funcionamento e desligado ($t_{on} + t_{off}$) pode ser dado pela equação (Eq.14) [20]:

$$T = \frac{1}{f} \quad (\text{Eq.14})$$

A relação entre o período de comutação, T correspondente a $t_{on} + t_{off}$ e o intervalo de tempo cujo interruptor está ativo, t_{on} , é dado pela equação (Eq.15) [18]:

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (\text{Eq.15})$$

Como a oscilação na corrente da indutância ΔI , durante os dois modos é a mesma, das equações anteriores pode derivar a próxima (Eq.16) [20]:

$$\Delta I = \frac{(V_{in} - V_{out}) * t_{on}}{L} = \frac{V_{out} * t_{off}}{L} \quad (\text{Eq.16})$$

Substituindo a (Eq.15) em (Eq.16), obtém-se (Eq.17):

$$(V_{in} - V_{out}) * DT = V_{out} * (1 - D) * T \quad (\text{Eq.17})$$

$$V_{out} = \frac{V_{in} * DT}{T} = V_{in} * D$$

Através da equação anterior, (Eq.17), percebe-se que ao variar o *duty cycle*, D , do circuito pode-se controlar a tensão de saída do mesmo. A esta equação também se pode chamar de função transferência do circuito, que se obtém pela caracterização do circuito nos dois modos de funcionamento.

Assim, após cálculo da equação (Eq.17) efetuado, com base nos valores de tensão de entrada, $V_{in} = 50 V$ e saída, $V_{out} = 15V$ conclui-se que D tem o valor de 0,3, e pode ser também chamado de relação de transferência de função, T_{vv} [17]. O resultado de D é um valor entre 0 e 1, o que nos leva a concluir que $V_{out} < V_{in}$. Assim é possível confirmar o objetivo deste conversor.

A escolha da frequência, f , do circuito baseou-se no facto de este não envolver potências demasiado elevadas (140 W), assim a frequência escolhida foi de 25 kHz. Para melhor compreensão do valor associado à frequência de comutação, foi consultada a bibliografia

existente para o efeito. Na mesma é possível perceber que para a tensão de *ripple* seja o mais reduzida possível a frequência de corte do filtro associado deve respeitar o seguinte $f_c \ll f$. f_c calcula-se de acordo com a equação (Eq. 18) [18].

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L * C}} \quad (\text{Eq.18})$$

Após cálculos efetuados a conclusão retirada é que f_c seria de 1357 Hz, e por isso escolhido aquele valor de frequência de comutação, uma vez que é mais elevada que a frequência de corte, mas ao mesmo tempo não é tão elevada como a usada para outros conversores.

A frequência relaciona-se com os restantes elementos do circuito pelo demonstrado na equação (Eq.19) [18]:

$$D = t_{on} * f \quad (\text{Eq.19})$$

Como mencionado anteriormente a potência de entrada deve coincidir com a potência de saída, não considerando as perdas do sistema, logo surge a equação (Eq.20) [20]:

$$I_{in} * V_{in} = I_{out} * V_{out} \quad (\text{Eq.20})$$

Dos cálculos anteriormente efetuados (Eq.20), atesta-se que para uma tensão de saída do retificador, correspondente a uma tensão de entrada do conversor, V_{in} , de 50 V, a corrente, I_{in} , será de 0,5 A. Assim, determina-se que I_{out} , tem valor de 1,67 A. Para o dimensionamento do circuito assume-se a premissa que $I_{out}=I_L$. Admitindo que a corrente na indutância, I_L , pode variar 1% no máximo, tem-se $\Delta I=0,1667$ A. Assim, determina-se L, através da próxima equação (Eq.21) [20]:

$$\Delta I = \frac{V_{out}(V_{in} - V_{out})}{f * L * V_{in}} \quad (\text{Eq.21})$$

$$L = \frac{V_{out}(V_{in} - V_{out})}{f * \Delta I * V_{in}}$$

A tensão de saída é de $V_{out} = 15$ V. Assumindo que a oscilação máxima permitida seja 1%, a oscilação da tensão de condensador pico a pico, ΔV_C , terá o valor 0,15 V. Através da próxima equação (Eq.22) [20] é exequível determinar o valor de C.

$$\Delta V_c = \frac{\Delta I}{8 * f * C} \Delta V_c \quad (\text{Eq.22})$$

$$C = \frac{\Delta I}{8 * f * \Delta V_c}$$

Através das demonstrações anteriores, foi efetuada a caracterização do circuito conversor c.c.-c.c. redutor, demonstrado na Tabela 5.

A determinação de L e C permite o dimensionamento de um filtro passa baixo à saída do conversor que irá estabilizar as formas de onda da tensão e da corrente e tornar o circuito mais estável.

Tabela 5: Resultados obtidos para o conversor c.c.-c.c. redutor

Gerador elétrico	Caracterização elétrica do retificador		Caracterização do conversor, L e C
Opção 1: + controlador de carga	-	-	$L = 2,5e^{-3} H$ $C = 5,56e^{-6} F$ Para $f = 25 kHz$, $V_{out} = 15 V$, $V_{in} = 50 V$, $\Delta I = 0,167 A$, $\Delta V_c = 0,15 V$
Opção 2	$V_{rms} = 36 V$ c.a. $V_{dc} = 48,6 V$ c.c. $I_{dc} = 4,86 A$ c.c.	$V_{ripple} = 35,8 V$	
Opção 3	-	-	

3.4.1 Controlo em malha fechada do conversor c.c.-c.c. redutor

É possível que um conversor c.c.-c.c. redutor opere em malha aberta, no entanto não haverá lugar para compensação de oscilações uma vez que não existe realimentação. Um controlo em malha aberta é o mais simples que se pode fazer num sistema, sendo que as variáveis de entrada são independentes das variáveis de saída, sem possibilidade de qualquer tipo de ajuste. Portanto, o controlo de um conversor em malha fechada é considerado essencial para a alta performance da eletrónica de potência.

Ao projetar o conversor redutor de forma a operar em malha fechada é possível obter uma saída regulada face às variações de carga e tensão de entrada, isto é, a tensão de saída do conversor pode ser regulada para nunca ultrapassar uma determinada gama definida. Esta regulação consegue-se através do *duty cycle*, D , do circuito. Analisando a (Eq.17) perceber-se que uma alteração em D faz variar a tensão de saída em função da entrada e vice-versa.

O objetivo do controlo do conversor é manter o equipamento com desempenho estável, face às perturbações e ruído e deve ser tido em consideração o seguinte: 1) erro nulo em regime

permanente; 2) resposta rápida a variações na tensão de entrada e na carga; 3) baixo *overshoot*; e 4) baixa suscetibilidade ao ruído.

Na Figura 13 está representado o diagrama de blocos do sistema de controlo para o conversor c.c.-c.c. redutor deste projeto.

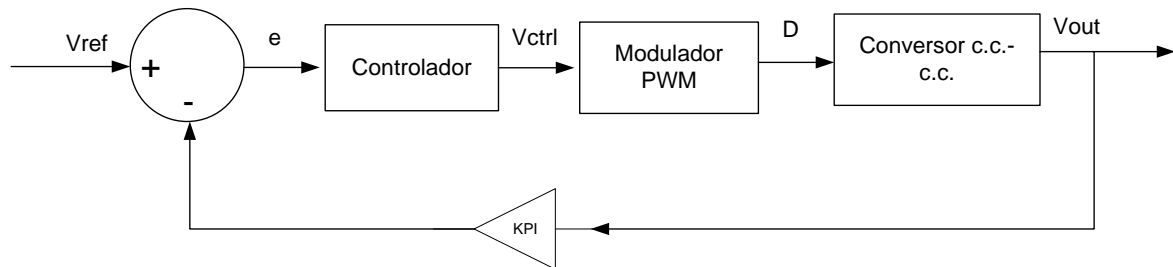


Figura 13: Diagrama de blocos de um sistema de controlo do conversor c.c.-c.c. redutor

O controlo em malha fechada, de uma forma geral, mede determinado valor no sistema que posteriormente é comparado com um valor de referência, para uma ação desejada. Um sinal de erro é desenvolvido e a variável de entrada é alterada consoante esse erro. Neste caso em concreto da Figura 13: a tensão de saída, V_{out} , do conversor é comparada com um valor de referência, V_{ref} , originando um erro, e . Esse erro é trabalhado de forma a produzir um comando ao *duty cycle*, D , que irá intervir diretamente no conversor.

O *duty cycle* de um conversor redutor, *buck*, pode estar sistematicamente a variar de forma a manter constante a tensão de saída. Esta variação acompanha as variações de carga ou variações na tensão de entrada. Essa mudança periódica está associada a uma realimentação negativa com PWM [16].

Para o conversor deste projeto, a gama de funcionamento de D está entre 0,3 e 0,75, para uma tensão estável à saída de 15 V e uma variação à entrada entre os 20 V e 50 V, isto é, quanto menor a tensão de entrada, maior será o *duty cycle*. Além disso, existe também uma relação com a carga, isto é, quando a carga for máxima, também o *duty cycle* será máximo [16].

O dimensionamento de L e C , na secção anterior, indicam que os valores destes são: $L = 2,5e^{-3} H$ e $C = 5,56e^{-6} F$.

Os passos a seguir para definição do controlo em malha fechada são os seguintes: 1) Definição do diagrama de blocos, Figura 13. Desde que um sistema seja possível de descrever matematicamente, então pode ser representado por via de um diagrama de blocos; 2) Definir um sistema de ganho por via da Transformada de Laplace, dando origem à função transferência; 3) Resposta em frequência correspondente ao tempo cujo sistema segue um distúrbio; 4) Determinação da estabilidade, ou seja, dada uma determinada entrada o sistema é capaz de responder adequadamente. Definição através do Diagrama de Bode.

Adicionalmente deve ser feita uma compensação PI ao conversor representado anteriormente de forma a eliminar o erro de forma mais eficiente.

Na Figura 14, está representado um diagrama simplificado do controlo em malha fechada do sistema, que será útil na determinação das equações do sistema.

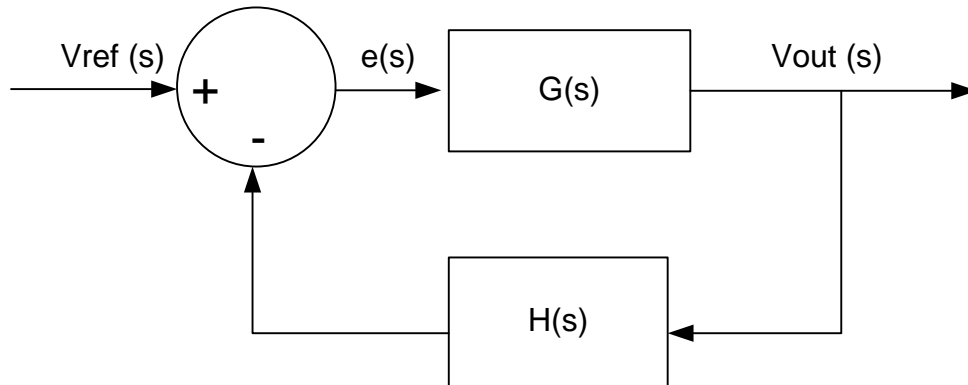


Figura 14: Diagrama simplificado do controlo em malha fechada.

A determinação da função de transferência em malha aberta, $G(s)$, está caracterizada na equação (Eq.23):

$$G(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = D(s) \quad (\text{Eq.23})$$

Através da bibliografia existente, a função transferência de saída do sistema traduz-se na equação (Eq.24) [16]:

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s) * H(s)} \quad (\text{Eq.24})$$

A função transferência de saída de um conversor redutor, é descrito como a equação (Eq.25) [21]:

$$\frac{V_{out}}{V_{ctrl}} = \frac{V_{out}}{V_{ref} * D} * \frac{1}{1 + \frac{s}{Q * \omega} + \left(\frac{s}{\omega}\right)^2} \quad (\text{Eq.25})$$

Sendo,

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ e } Q = R * \sqrt{C/L}.$$

A equação anterior tem 2 polos, calculados a partir do denominador da função.

Ao simplificar a equação (Eq.25), assumindo os valores anteriormente determinados de $L = 2,5e^{-3} H$, $C = 5,56e^{-6} F$ e $R = 3 \Omega$, ou seja, $\omega = 8,4819e3$ e $Q = 0,1415$, considerando a bibliografia, que indica $V_{out} \approx V_{ref}$, então a função de transferência do sistema é (Eq.26) [16]:

$$= \frac{1}{1 + 8.333e^{-4}s + 1,39e^{-8}s^2} * \frac{1}{D} \quad (\text{Eq.26})$$

De acordo com a bibliografia existente, para efetuar um controlo PI é necessário multiplicar a equação em malha aberta (Eq. 22) pela expressão $k_i + k_p/s$.

A função de transferência em malha fechada é a equação (Eq.27) [16]:

$$V_{out}(s) = \frac{(k_i + k_p s) * G(s)}{s + k_p s * G(s) * H(s) + k_i * G(s) * H(s)} * V_{in}(s) \quad (\text{Eq.27})$$

Através do controlo por realimentação em malha fechada é possível obter a caracterização desejada, visto que permite que o conversor c.c.-c.c. responda a mudanças na fonte de entrada, carga ou outro parâmetro.

3.5. Bateria

A implementação de uma bateria permite a acumulação da energia produzida pelo sistema. Uma das características do projeto é que este não produz energia constantemente, dessa forma a utilização de uma bateria permite a disponibilização de energia de uma forma constante, mesmo que esta não esteja a ser produzida. Ainda assim, deve-se perceber que o armazenamento de energia em baterias é limitado, sendo que a duração da bateria varia evidentemente com o consumo energético dos dispositivos a ela ligados [22].

Uma bateria consiste em uma ou mais células eletroquímicas, conectadas em série ou paralelo. Através destas células é possível armazenar energia química que posteriormente é convertida em energia elétrica, através de reações eletroquímicas. As células são constituídas por um ânodo, um cátodo e um eletrólito que separa os dois elétrodos, tal como está ilustrado na Figura 15.

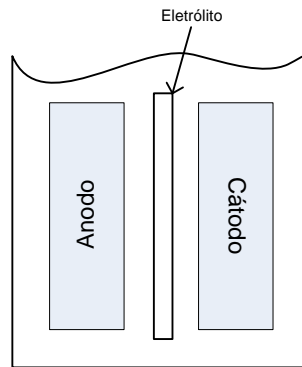


Figura 15: Esquemático de uma célula eletroquímica.

Durante o fornecimento de corrente elétrica da bateria para um circuito ou sistema, o ânodo liberta elétrons para o circuito e o cátodo recebe os elétrons do circuito. Estes elétrons são gerados por reações eletroquímicas dentro da bateria e são chamados de espécies eletroativas. [23]

Existem diferentes tipos de baterias de acordo com as tecnologias utilizadas, sendo sempre necessário considerar alguns aspectos como densidade de energia, ciclo de vida, impacto ambiental, segurança, custo, tensão de alimentação disponível e características de carga/descarga. As tecnologias mais populares de baterias recarregáveis são Níquel Cádmio, Níquel Metal Hidreto, Íon Lítio, Alcalina e Lítio Polímero [23].

Atualmente é possível o dimensionamento de modelos analíticos de baterias que auxiliam na previsão do comportamento de baterias que permitem a determinação de informações importantes da mesma tais como tempo de vida, desempenho, entre outras. Pela bibliografia é possível perceber quais são os modelos analíticos existentes, estes são Modelo Linear, *Lei Peukert's*, *Rakhmatov* e *Vrudhula* e *Modelo Kinetic* [22] [23] [24].

O modelo de bateria implementado em *SIMULINK-MatLab* corresponde a um modelo genérico desenvolvido. Este modelo consegue reproduzir baterias recarregáveis mais populares. A bateria escolhida para o projeto é uma bateria Lítio-Ion. Esta é considerada uma bateria de alta capacidade que pode ser utilizada em diferentes gamas de energia [25].

A tensão nominal definida foi de 12 V, uma vez que é esse o objetivo pretendido, tendo em consideração a análise dos equipamentos do mercado. O estado da carga (*State of Charge - SOC*, em inglês) define o estado com que a carga vai aumentando ou diminuindo no sistema, isto é, define a capacidade e a energia útil que podem ser utilizadas em um determinado momento, sendo influenciado por diversos fatores tais como resistência interna, tipo de descarga, modo de descarga e taxa de descarga [23].

A resistência interna aumenta significativamente sempre que a bateria sofre uma sobre-carga ou sobre-descarga. Este fenômeno é sensível à temperatura e varia inversamente com ela. Os

tipos de descargas existentes são contínuo e intermitente. Uma descarga contínua traduz-se por um fornecimento contínuo de energia para o sistema, fazendo com que a capacidade da bateria diminua continuamente. A descarga intermitente ocorre quando a bateria fornece energia para o sistema por algum intervalo de tempo. Os modos de descarga existentes são sistema contante, corrente constante e potência constante. As diferenças entre eles são, o modo de descarga com sistema constante significa que o sistema que a bateria alimenta tem uma resistência constante. Por outro lado, se for corrente constante, significa que o sistema diminuí continuamente a sua resistência para manter a corrente de descarga. Um modo de descarga cuja potência elétrica é constante traduz-se por um aumento na corrente de descarga de forma a compensar a diminuição da tensão. Com este modo de descarga as baterias apresentam menor tempo de vida. A taxa de descarga/carga indica a corrente de carga ou descarga à qual a bateria foi submetida [23].

Inicialmente e de forma a não comprometer o restante funcionamento do sistema, o *SOC* foi definido com o valor 80 %, ou seja, 80 % da carga da bateria está completa.

3.6. Inversor c.c.-c.a.

Ao falar de um inversor c.c.-c.a. está-se a falar de um conversor de tensão, que converte energia de uma bateria ou outra fonte de tensão contínua em corrente alternada, sem auxílio de máquinas rotativas ou interruptores mecânicos. A sua configuração é através de dispositivos semicondutores de potência, que funcionam como interruptores estáticos. Na sua configuração tem também um circuito de controlo que providencia os pulsos necessários *On* e *Off* com os tempos corretos, na sequência adequada. Os inversores de tensão tem por norma, configurações e componentes diferentes de conversores de corrente.

Em termos práticos, um inversor retira potência de uma fonte fixa de tensão contínua e aplica-a numa carga de tensão alternada, sendo que a rede de energia elétrica é a mais conhecida carga ativa CA.

As diferentes categorias dos inversores são: inversor de tensão, inversor de corrente, inversor de corrente regulada (do tipo Histerese) e inversor de fase controlada. Além disso, existem também várias configurações de inversores como por exemplo: inversores de meia ponte, inversores de três níveis, inversor de ponte completa, entre outras.

O ajuste dos parâmetros para os inversores depende se a carga é ativa ou passiva, ou seja, respetivamente se esta tem os seus tempos de atuação, ou se age apenas como uma impedância. O controlo dos inversores à semelhança dos conversores pode ser feito através de *PWM*.

Outro aspeto importante de considerar quando se realiza um estudo a inversores é a forma de onda de saída. Idealmente deve ser sinusoidal para a maioria das aplicações, no entanto, devido à existência de harmónicos, esta tende a ter outras formas. Dessa forma, no dimensionamento de um inversor deve ser considerado o dimensionamento de um filtro na saída do inversor.

As aplicações onde é frequente o uso de inversores é o motor CA e fontes de alimentação ininterrupta (UPS). Para a situação concreta do motor CA é devido ao controlo de velocidade, via frequência, possível de fazer através do inversor. Quanto às fontes de alimentação ininterrupta (UPS), estas servem para sistemas que devem ser totalmente confiáveis e que em nenhuma circunstância devem ficar sem energia elétrica. Nesta situação, o inversor mantém a tensão correta e frequência, de forma a estar sempre estável [15] [16]

No caso deste projeto, a carga aplicada ao inversor é passiva, uma vez que atua apenas como uma impedância. O estudo do comportamento do inversor não foi considerado para este projeto. O inversor selecionado será do tipo inversor de tensão, uma vez que irá estar ligado a uma bateria.

3.7. Estimativa geral de custos de conceção do projeto

A caracterização do projeto sob o ponto de vista económico dá uma perspetiva importante para viabilizar ou não a produção do mesmo. Após análise do mercado, apurou-se uma média de custos para alguns dos componentes mecânicos no projeto e todos os componentes elétricos envolvidos. Os resultados da análise do mercado são apresentados na próxima Tabela 6, cujas duas primeiras linhas serão explicadas com maior detalhe no capítulo seguinte, dado serem componentes mecânicos.

Tabela 6: Caracterização da média de custos do projeto

Equipamento	Quantidade mínima requerida	Custo médio (€)
Mola espiral	1	40
Mola de Segurança	1	40
Gerador trifásico	1	400
Retificador Trifásico	1	25
Conversor c.c.-c.c. redutor	1	130
Conversor c.c.-c.a.	1	150
Bateria	1	50

Através desta estimativa geral e simplista, é possível apurar que esta plataforma terá um custo mínimo de 835 €. Esta é uma estimativa ligeira, uma vez que não inclui a completa análise mecânica projetada e os diversos acabamentos finais.

Para a análise das características mecânicas, segue-se o Capítulo 4. A constatação e verificação de resultados será feita no próximo Capítulo 5.

Capítulo 4 – Estudos mecânicos

Este Capítulo faz uma análise do projeto sob o ponto de vista mecânico. A explicação detalhada de todos os passos considerados neste estudo estão nos Anexos I e II.

4.1. Estrutura Funcional

O desenvolvimento do sistema mecânico teve em conta um conjunto de aspetos considerados relevantes, onde se destacam a ergonomia, a força motriz/motricidade, a segurança, a estrutura de suporte envolvente, os elementos orgânicos, as características dos materiais, facilidade de aquisição e fabrico, normas, o respeito pelas normas, entre outras. O projeto final do sistema mecânico apresenta-se na Figura 16 e Figura 17, sendo possível verificar considerações técnicas gerais para o projeto no Anexo I e a análise detalhada de toda a estrutura no Anexo II.

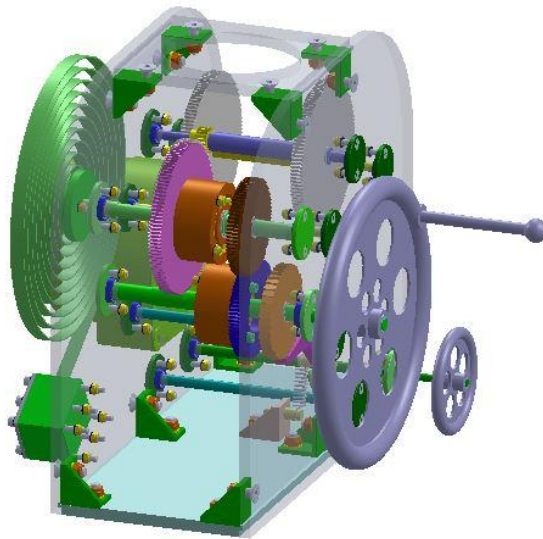
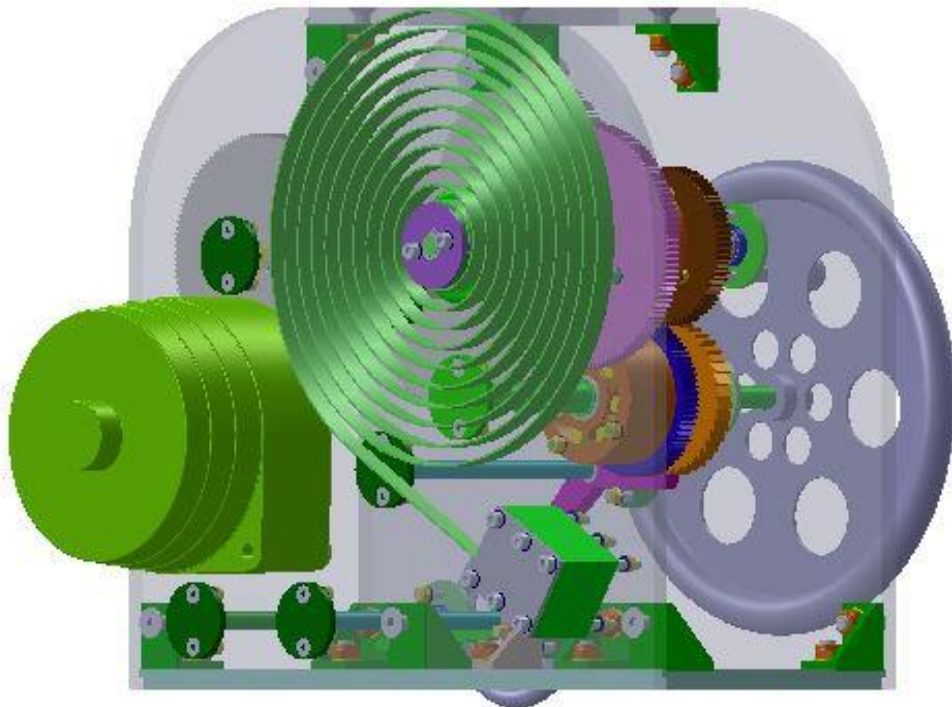
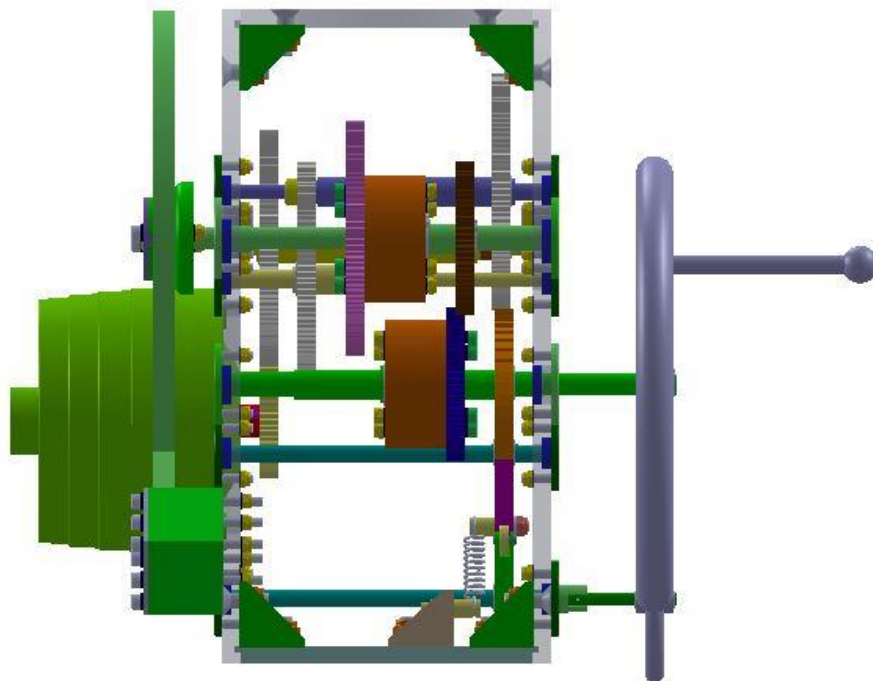


Figura 16: Projeto final do sistema mecânico. Vista dimétrica superior

O sistema mecânico considera a utilização de uma mola em espiral plana, e com lâmina de secção retangular como elemento orgânico de base para acumulação e devolução de energia (potencial). Para acionamento do sistema, recorre-se a um volante ou manivela que se movimenta através de força humana.



a)



b)

Figura 17: Projeto final do sistema mecânico a) Vista dimétrica esquerda b) Vista frontal

Para o elemento orgânico acumulador de energia foi analisada a possibilidade de considerar diferentes tipos de mola existentes no mercado. A primeira opção passou por considerar molas de tração/compressão. No entanto, este tipo de molas obrigaria ao recurso a um sistema mecânico de maior complexidade. Assim, no sentido, de facilitar os elementos estruturais do

dispositivo, a escolha recaiu na opção que dizia respeito a uma mola espiral plana. A mola projetada, que se ilustra mais em detalhe na Figura 18 a) e b) é uma espiral plana, (sistema corda de relógio, com zona de encaixe em ambas as extremidades – acumulador de energia). A mola é fixa à estrutura de suporte na sua extremidade exterior, sendo a extremidade interior acoplada a um veio, e é através da rotação do veio que se comprimem as espiras. Para ponto de partida foi estabelecido que a mola deveria permitir entre 5 a 10 voltas, garantido uma acumulação de energia equivalente a um binário mínimo de 12 N.m. A mola é produzida em aço liga especial para fabrico de molas, com um módulo de Young de 207 GPa, coeficiente de Poisson de 0,3 e com as seguintes características dimensionais: secção transversal do arame de 11,5 mm*1,2 mm; 10 espiras úteis; diâmetro de 265 mm. Está ilustrada na Figura 18, sendo a) o modelo em 3D e b) a mola produzida final.

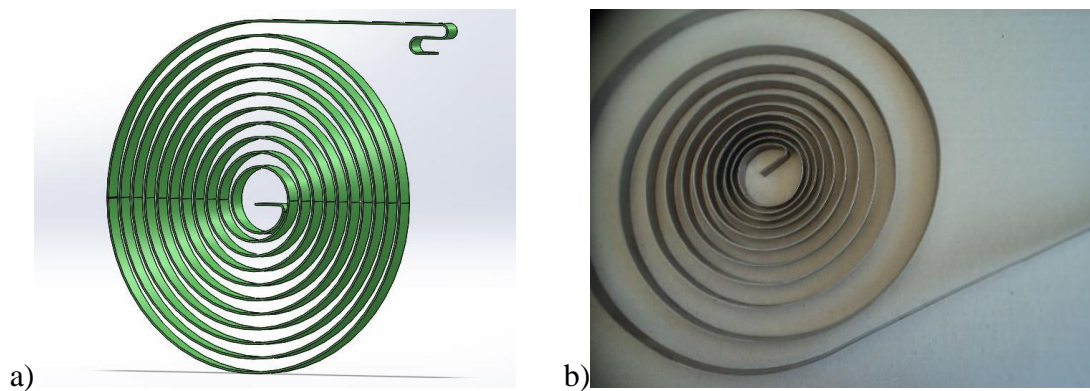


Figura 18: Mola em Espiral: a) Modelo 3D; b) Modelo real final

O acoplamento da mola à estrutura de suporte é feita através de um bloco de encaixe e aperto, representado na Figura 19, a) e b). Este componente estrutural bloqueia a mola e é fixo à estrutura através de seis parafusos M5x65, da classe 8.8. A extremidade central da mola, que permite o movimento, é encaixada no veio através de ranhura com as dimensões do arame, sendo bloqueada através de uma flange apertada com dois parafusos M5x35 de classe 8.8.

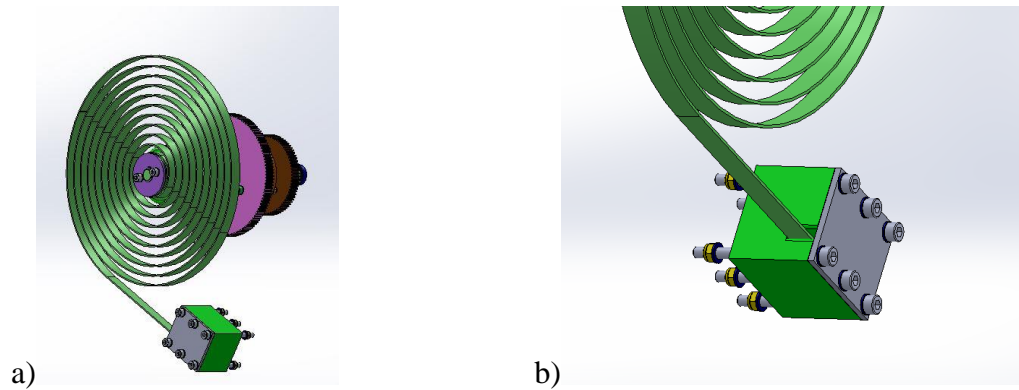


Figura 19: Fixador da mola a) Perspetiva geral. b) Detalhe do fixador da mola

A ação mecânica do sistema é iniciada através da força humana, pelo meio de um volante com apoio manual, ilustrado na Figura 20. O arranque do sistema, impulsionado pela força humana, deverá ser necessariamente cómodo, suave e seguro. Apesar da existência de um sistema de segurança mecânico, foi considerado um *design* do volante com arestas arredondadas para evitar ferimentos ou acidentes caso ocorram falhas do sistema. O acoplamento do volante ao veio é garantido por um escatel, com bloqueio na extremidade através de uma tampa e dois parafusos cónicos M5x20.

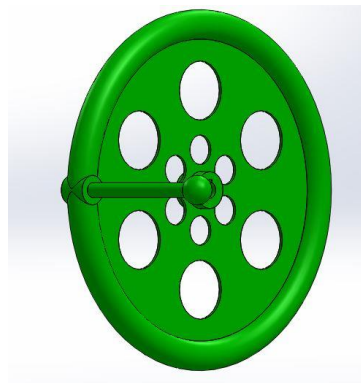


Figura 20: Modelo 3D do Volante/Leme

O sistema mecânico entre o veio do volante e o veio da mola incorpora uma escada de rodas dentadas, dimensionadas de modo a que qualquer indivíduo consiga realizar o movimento de rotação no volante, e conseqüentemente promover a acumulação de energia na mola, traduzido em termos práticos pelo equivalente a uma força inferior ao levantamento de um garrafão de água de cinco litros. Esta fase é designada como alimentação da mola do sistema.

O grupo de engrenagens do sistema mecânico deve complementarmente multiplicar a rotação do veio acoplado à mola, de modo a acionar o gerador de ímanes permanentes de baixa rotação, 600 rpm. Foi possível, através dos cálculos que se apresentam na Tabela 7, verificar a

necessidade de acoplamento em escada de um total de oito rodas dentadas, de modo a atingir o objetivo. Na Figura 21 a) e b) podem ser vistas seis das engrenagens dimensionadas. Identificam-se na Tabela 7, quatro engrenagens com diâmetro 124 mm, duas engrenagens com diâmetro 20 mm, uma engrenagem com 15 mm, outra com 60 mm de diâmetro, acopladas a quatro veios bi-apoiados nas extremidades e com diâmetros de 16 mm.

Tabela 7: Dimensionamento do grupo de engrenagens

Veio nº	Voltas	Roda >	Roda <	Minutos		Razão Transmissão [i]				
				rpm x 10	1					
1	10	124		10	1,00		9,77	0,80	12,21	
2	62	20	124	62	6,20	6,20	7,81	0,80	9,77	
3	384		20	384	38,44	6,20	6,25	0,80	7,81	
4	3178		15	124	3178	317,77	1,33	5,00	0,80	6,25
Gerador	6567			60	6567	657	2,07	4,00	0,80	5,00

A escolha feita para o grupo dimensionado recaiu em engrenagens cilíndricas, com dentes retos e módulo $m=1$. De referir que este é o tipo de engrenagem mais comum e mais económico existente no mercado.

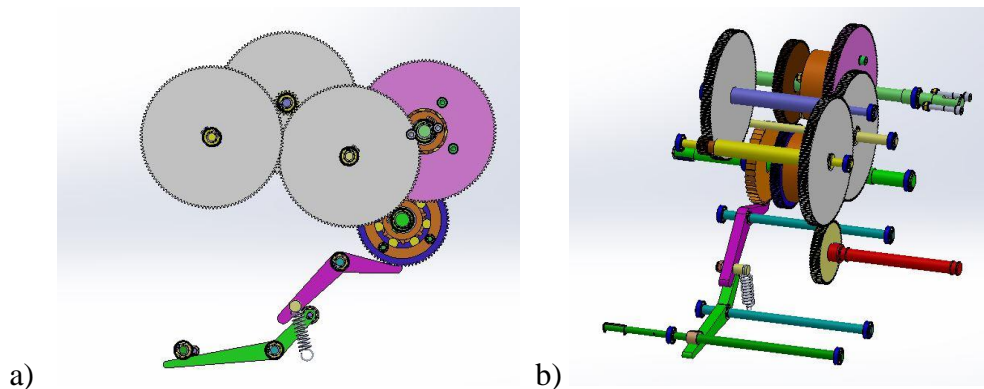


Figura 21: a) Escada de engrenagens dimensionada b) Veios de acoplamento de engrenagens

A transmissão mecânica feita entre engrenagens tem a designação de relação de transmissão, também conhecida por relação de velocidades. Num acoplamento típico entre duas engrenagens, uma das rodas é designada por roda motora e a outra por roda movida. Apesar de ser possível o engrenamento entre mais do que duas rodas, no sistema desenvolvido optou-se pelo engrenamento simples com duas rodas. Neste caso, a relação de transmissão é obtida pela relação entre as velocidades de rotação das duas rodas. A relação de transmissão pode também ser obtida através da conjugação do número de dentes da roda motora e da roda movida, a equação (Eq.28) [26] traduz a relação de transmissão:

$$i = \frac{n_a}{n_b} = \frac{\omega_a}{\omega_b} \quad (\text{Eq.28})$$

A rotação das rodas é garantida através de um conjunto de veios, de secção circular maciça, que estão representados na Figura 21 - b). Todas as rodas são fixas nos veios através de chavetas. Os veios são bi-apoiados em rolamentos encaixados na estrutura de suporte e freados nas suas extremidades. Deste modo garante-se que o veio é apoiado e pode rodar livremente com atrito desprezável permitindo maior rendimento na transmissão de potência. Os veios foram dimensionados através do código ASME B106.1M-1985, admitindo rendimentos de 100 % na transmissão de potência. O Anexo II ilustra com maior detalhe todos os acoplamentos do sistema mecânico.

Os veios dimensionados têm diâmetro de 16 mm, e o seu comprimento nunca é maior que a largura da estrutura, o que corresponde a 168 mm, uma vez que não são extensíveis até ao exterior, tanto por questões técnicas, como pelo *design*.

Quanto aos rolamentos dimensionados para o projeto foram considerados dois tipos: rolamentos de esferas rígidas e rolamentos antirretorno. Os rolamentos de esferas rígidas caracterizam-se por ter no seu interior rolamentos de esferas, que permitem a rotação. Quanto aos rolamentos antirretorno, estes permitem movimento em apenas um sentido. São muito úteis em sistemas que seja necessário controlar sentidos de movimentos dos elementos orgânicos existentes.

Considerando que a exposição do utilizador perante o sistema no que toca a forças é elevada foi necessário considerar um sistema de segurança, ilustrado com detalhe na Figura 22, a) e b). A solução compreende um sistema de bloqueio e antirretorno. O invólucro da estrutura serve naturalmente de barreira física contudo, e para diminuir a probabilidade de ocorrência de acidentes, foi dimensionado o sistema de segurança. Este consiste em evitar danos, no caso de a mola estar carregada com a sua energia potencial máxima e por alguma razão se liberte da fixação. A mola helicoidal e patilha garante o sistema de segurança, isto é, amortiza as oscilações provocadas por uma eventual falha a jusante destes elementos orgânicos.

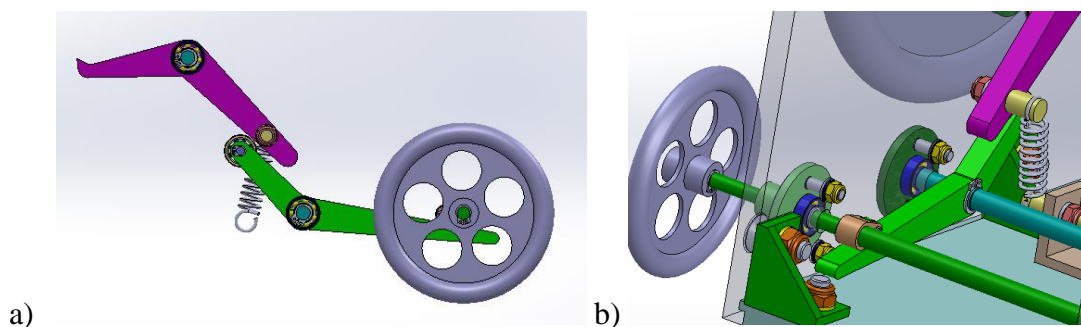


Figura 22: a) Sistema de segurança - Desenho 3D b) Detalhe do sistema de segurança

O posicionamento do volante e o acionamento do sistema de bloqueio e segurança em oposição espacial à mola de acumulação de energia e ao gerador elétrico cria uma barreira/fronteira entre a zona de operação e a localização do armazenamento de energia que representa um potencial de risco elevado.

Assim, está garantido o carregamento do sistema eletromecânico, sendo possível realizar a tarefa de forma continuada ou através de pausas entre cada volta.

O propósito do projeto é que a acumulação de energia desencadeada pelo movimento do volante em contacto com a mola e engrenagens seja capaz de responder aos objetivos, de uma forma segura e cómoda.

Capítulo 5 – Implementação e simulações do sistema

Para o estudo computacional da plataforma, ou seja, simulações do sistema foi usado o *SIMULINK-Matlab*, programa que permite através de diversos blocos definir o ambiente de simulação ideal para o projeto [27].

As simulações feitas foram baseadas nos contornos definidos na Figura 8. Após a simulação isolada de cada um dos blocos foi feita a integração total. Alguns dos componentes ilustrados no diagrama de blocos da Figura 8 são de origem comercial, envolvidos com tracejado e nomeados respetivamente. Por outro lado, estão identificados também os equipamentos dimensionados para o desenvolvimento do projeto.

Para a simulação dos componentes mencionados foi necessária a descrição detalhada das características elétricas, assim como definição das variáveis envolvidas no sistema.

Os primeiros componentes a serem estudados e simulados estão identificados na Figura 8 através de um retângulo nomeados de gerador de ímãs permanentes, retificador trifásico e conversor c.c.-c.c. redutor.

A Figura 23 apresenta o esquema elétrico detalhado dos primeiros componentes a simular. Está representado na figura o gerador de ímãs permanentes, o retificador trifásico em ponte, o conversor c.c.-c.c. redutor e a bateria. Envolvido pela caixa azul está um filtro LC simulado para estabilizar as formas de onda à entrada no conversor redutor. Serão apresentadas as formas de onda com e sem a sua utilização, para assim se perceber a sua importância.

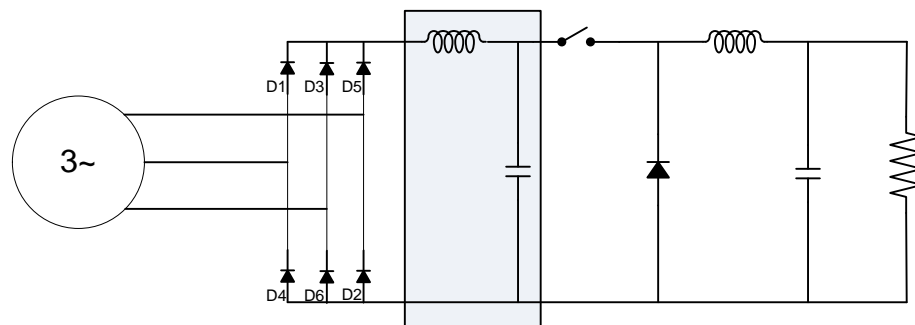


Figura 23: Esquema elétrico da simulação, constituído por gerador, retificador trifásico em ponte, filtro LC conversor c.c.-c.c. redutor. e bateria

O objetivo do estudo dos quatro componentes representados na Figura 23 é perceber a gama de funcionamento do gerador para o qual é possível e viável alimentar a bateria. A eletrónica de potência implementada, isto é, o retificador trifásico e conversor c.c.-c.c. redutor tem como função, respetivamente, converter a corrente alternada para corrente contínua e reduzi-la em

valores mais baixos, para que seja possível alimentar a bateria. A utilização destes componentes melhora a eficiência dos processos de conversão de energia.

Ao esquema representado na Figura 23 foram implementadas pequenas alterações para dessa forma obter circuitos diferentes e simular as diversas fases, representados na Figuras 24, 33, 39 e por fim através da integração de todos os componentes na Figura 46.

Na Figura 24, está representado o esquema elétrico correspondente à primeira simulação estudada. Na figura pode ver-se uma fonte de tensão trifásica associada ao retificador trifásico, de seguida o filtro LC e depois o conversor c.c. redutor e resistência. A troca da bateria pela resistência justifica-se uma vez que se pretende a simulação de um circuito puramente resistivo.

Foi implementada uma diferenciação por cores no circuito de forma a torná-lo de mais fácil leitura.

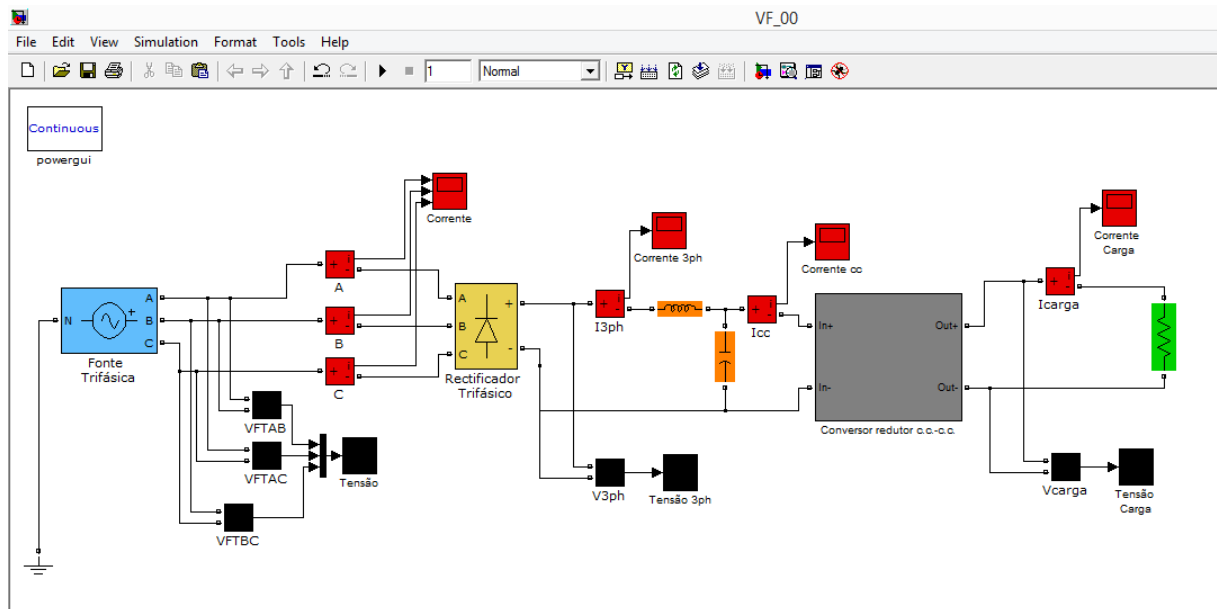


Figura 24: Esquema elétrico com fonte trifásica e resistência

Na Figura 25 está ilustrado o esquema elétrico do subsistema desenvolvido para *SIMULINK-Matlab* do conversor redutor c.c.-c.c. A caracterização visual com diferenciação de cores foi feita para auxiliar na compreensão.

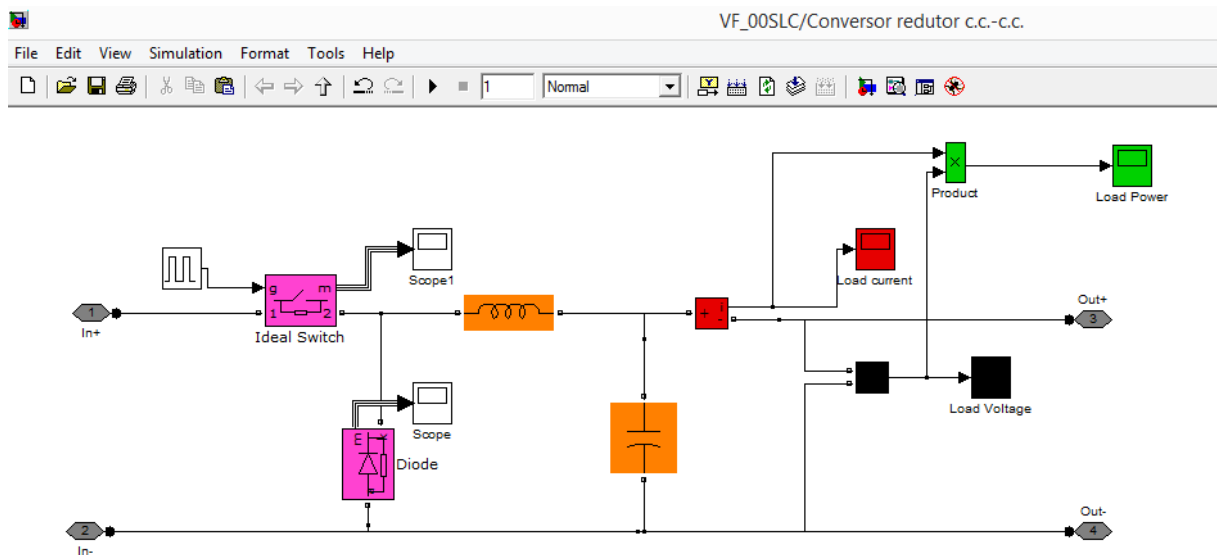


Figura 25: Esquema elétrico do subsistema do conversor redutor c.c.-c.c.

No Capítulo 3: caracterização do sistema, Tabela 5, foram definidos os parâmetros do conversor redutor.

Os resultados da simulação do circuito, denominado “VF_00”, representado na Figura 24 vem na sequência do dimensionamento do circuito. A fonte trifásica foi iniciada com uma frequência de 50 Hz e uma amplitude V_{ef} de 25 V. A resistência de carga em lugar da bateria tem valor 1 Ω .

As Figuras 26, 27, 28, 30, 31 e 32 correspondem às formas de onda do circuito simulado.

Na próxima Figura 26 é nítido o desfasamento da corrente entre as fases A, B e C. Verifica-se também alguma oscilação inicial que após 0,1 s se tornou estável.

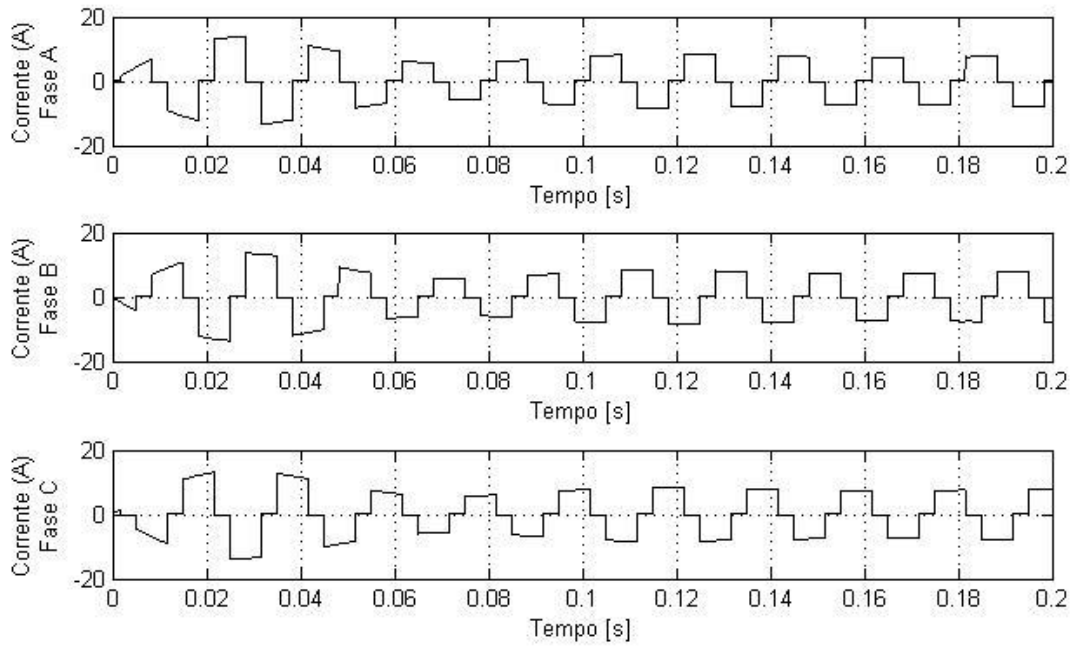


Figura 26: Formas de onda da corrente à saída da fonte trifásica, das diversas fases A, B e C

Na Figura 27, estão ilustradas as formas de onda da tensão entre as diversas fases. À semelhança das formas de onda da corrente é visível o desfasamento entre as fases. Verifica-se oscilação entre -35 V e 35 V pico-a-pico (V_{pp}), que corresponde ao valor de tensão máxima associado ao valor de tensão eficaz indicada no bloco, V_{ef} de 25 V. O período das ondas é 0.02 s correspondendo a uma frequência de 50 Hz, conforme foi definido no bloco.

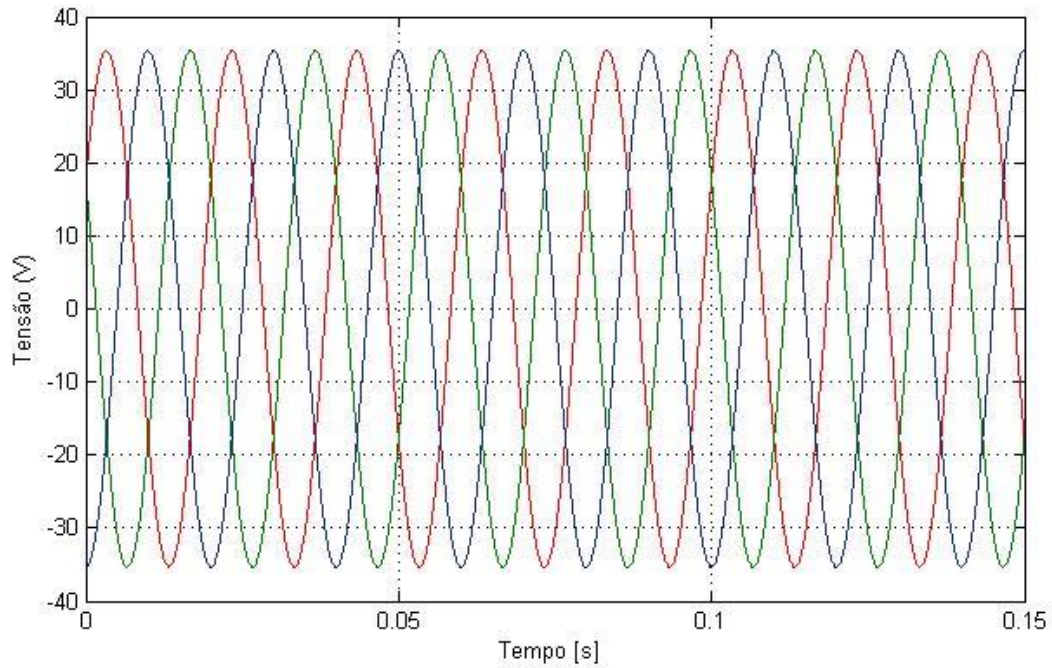


Figura 27: Forma de onda da tensão de saída entre as fases AB, CA, BC

As formas de onda apresentadas nas últimas duas figuras correspondem às formas de onda da corrente e tensão, respetivamente a jusante da fonte trifásica. Considerando a parametrização feita, estas formas de onda são as esperadas, como já foi constatado nos comentários anteriores.

Na Figura 28, onde se ilustra a forma de onda da corrente à saída do retificador trifásico verifica-se alguma instabilidade inicial que após os 0.1 s diminui e estabiliza nos 8 A.

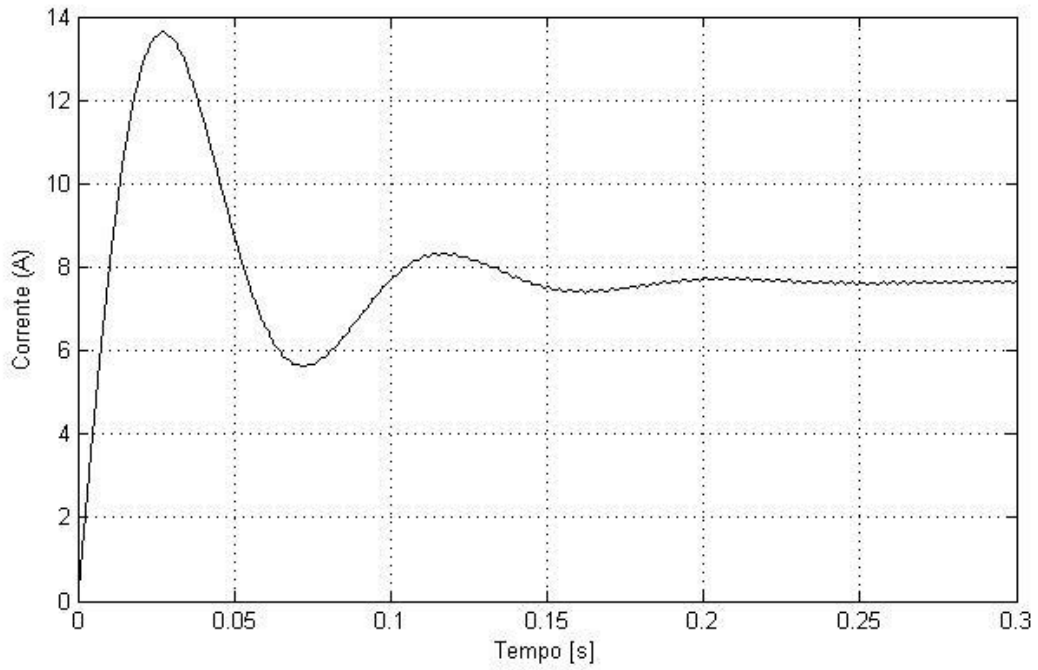
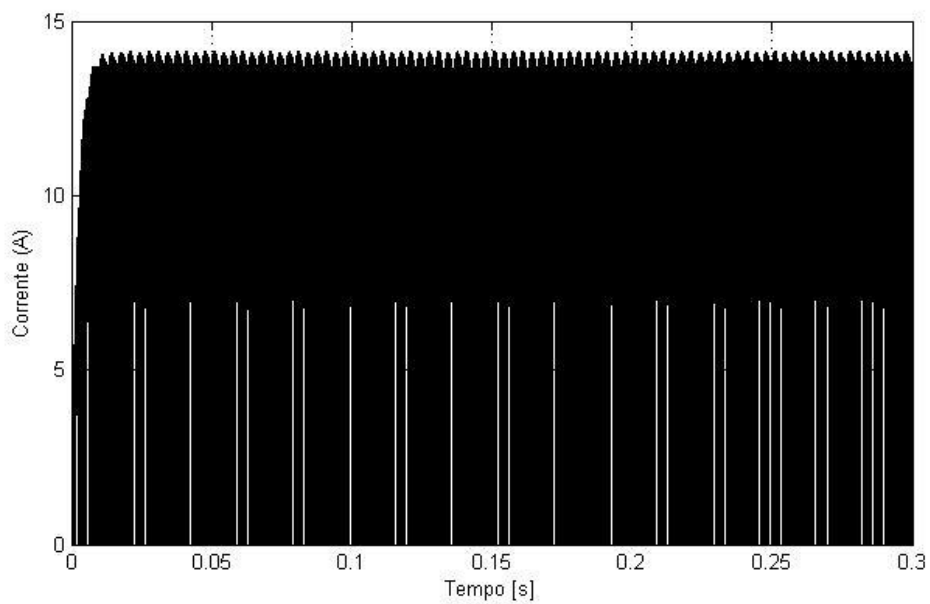
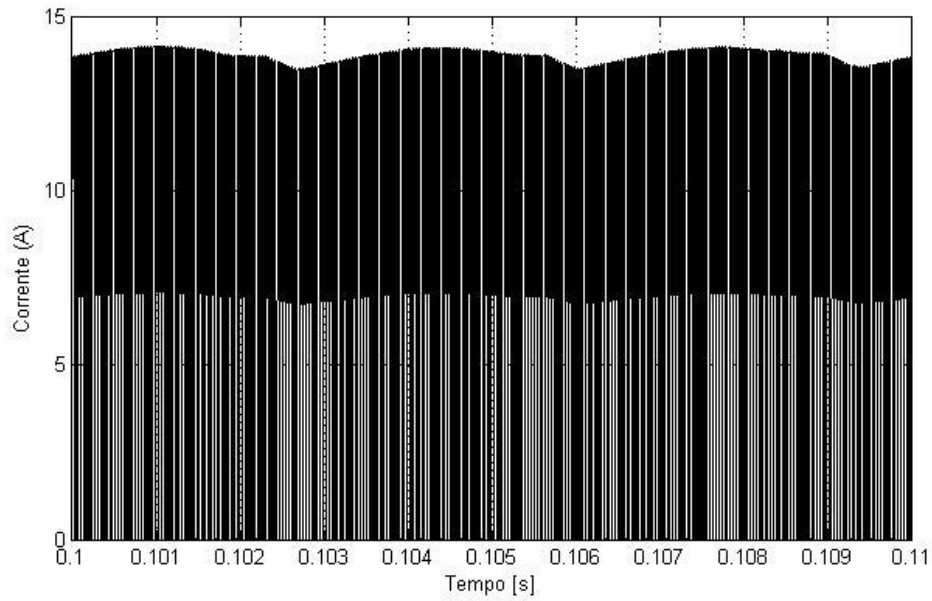


Figura 28: Forma de onda da corrente à saída do retificador trifásico com efeito do filtro LC

Por outro lado, na Figura 29 a) e b), é apresentada a forma de onda da corrente à saída do retificador trifásico, sem efeito do filtro LC, com diversos intervalos de simulação, sendo nítida a existência de interferências ao circuito.



a)



b)

Figura 29: Forma de onda da corrente à saída do retificador trifásico sem efeito do filtro LC
a) entre 0 s e 0,3 s b) entre 0,1 s e 0,11 s

Na Figura 30 tem-se a forma de onda da tensão à saída do retificador trifásico, existindo uma tensão com algum *ripple* entre os 29 V e 34 V.

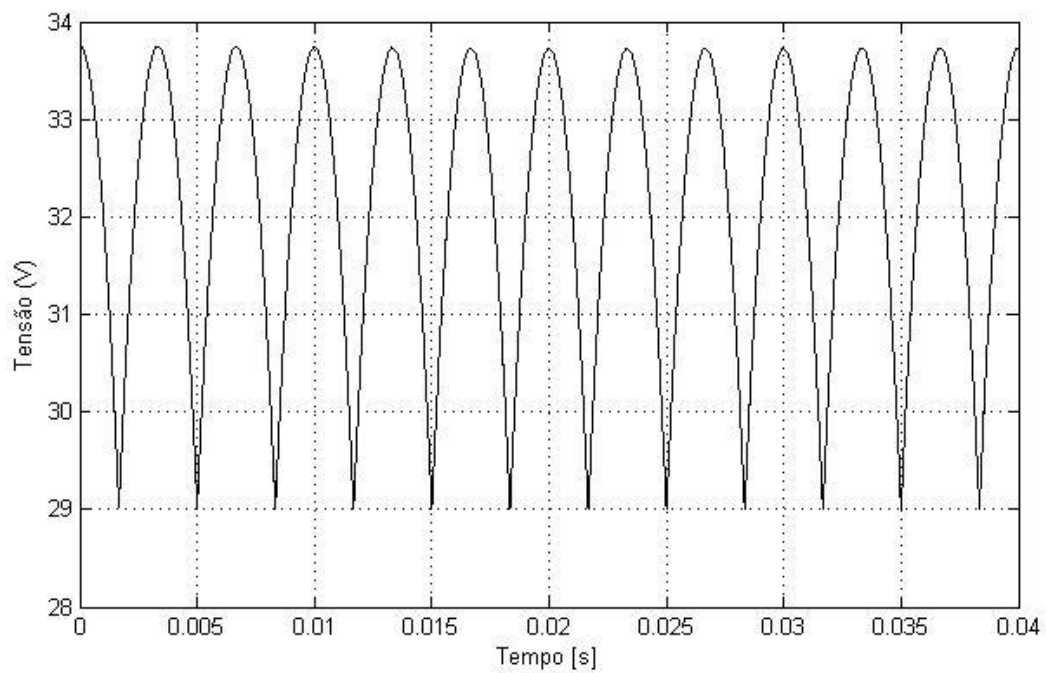


Figura 30: Forma de onda da tensão à saída do retificador trifásico com efeito do filtro LC

Na Figura 31, ilustra-se a forma de onda da corrente na carga. À semelhança das anteriores apresenta oscilação até 0.1 s, e após isso estabiliza.

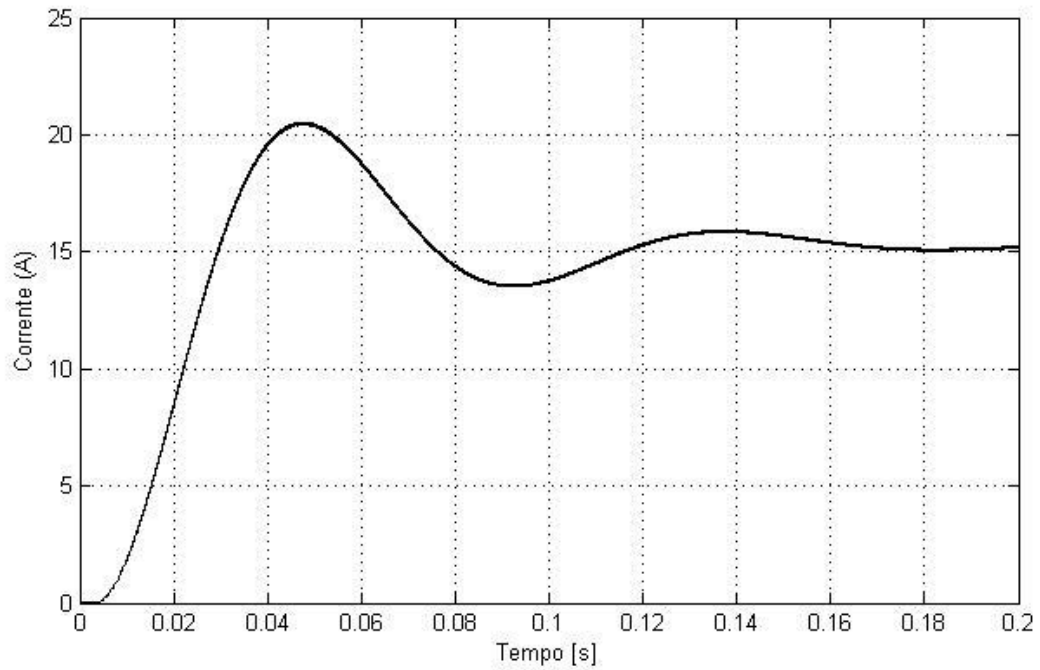


Figura 31: Forma de onda da corrente na carga, $R=1 \Omega$

Na Figura 32, é apresentada a forma de onda da tensão na carga, após efeito do conversor. Como era de esperar a tensão estabilizou até aos 15 V.

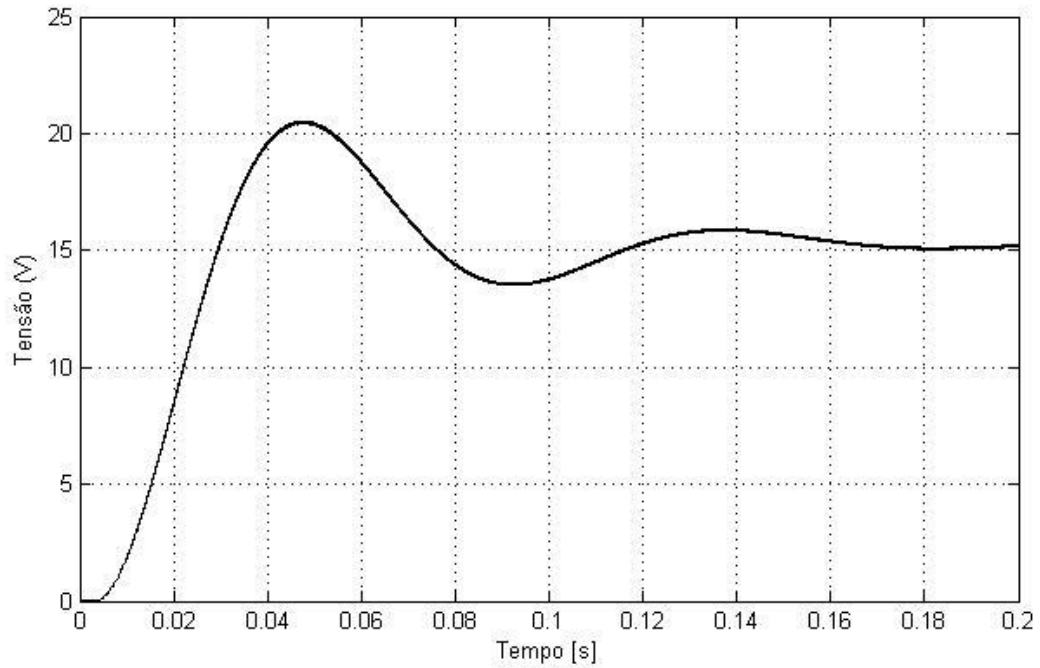


Figura 32: Forma de onda da tensão na carga, $R=1 \Omega$

Pode-se concluir através das Figuras 31 e 32 que será possível carregar uma bateria de tensão 12 V.

Na Figura 33, a configuração difere em alguns aspetos na medida em que está representada a fonte de tensão trifásica associada ao retificador trifásico, o filtro LC, o conversor c.c. redutor e bateria.

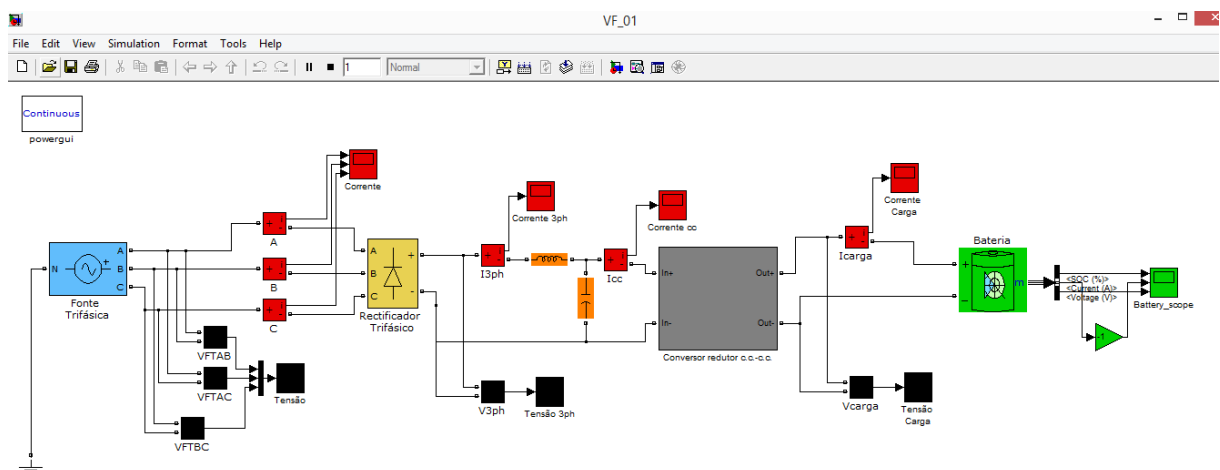


Figura 33: Esquema elétrico com fonte trifásica e bateria

Para este circuito, a simulação elaborada denomina-se de “VF_01” e está disponível para consulta. As formas de onda da corrente e tensão junto à fonte trifásica mantêm o comportamento, assim como as formas de onda após o retificador trifásico, pelo que não será necessária a transcrição das mesmas para o documento.

Na Figura 34, apresenta-se a forma de onda da corrente na carga. Esta apresenta alguma instabilidade inicial que estabiliza ao longo do tempo.

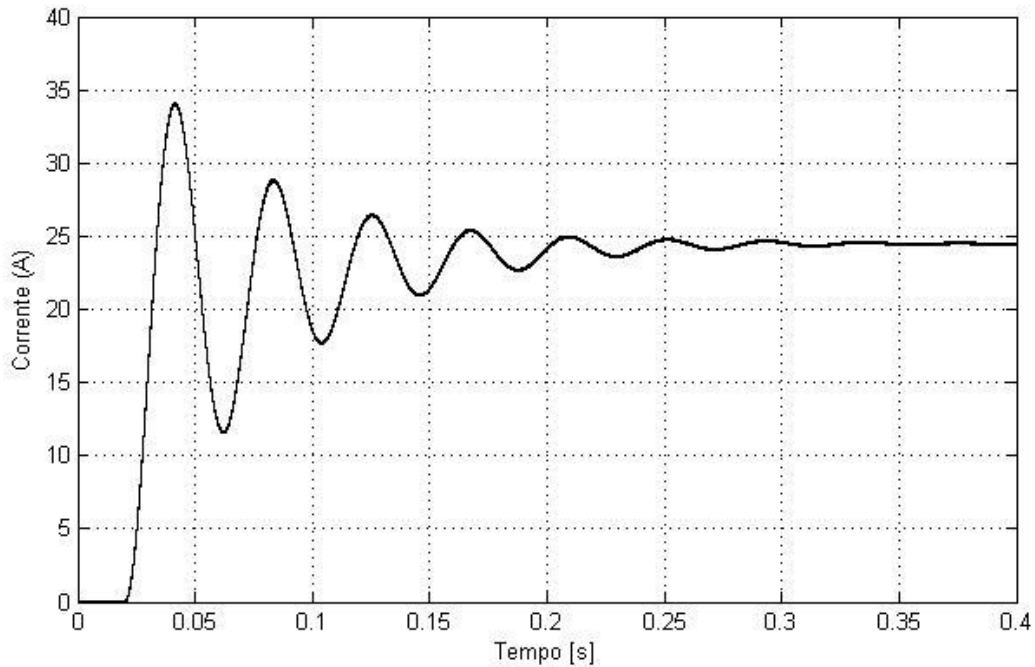


Figura 34: Forma de onda da corrente na carga, após conversor redutor c.c.-c.c.

Na Figura 35, onde se vê a forma de onda da tensão na carga, após conversor redutor é possível constatar que a mesma está estável nos 15 V, como é de esperar.

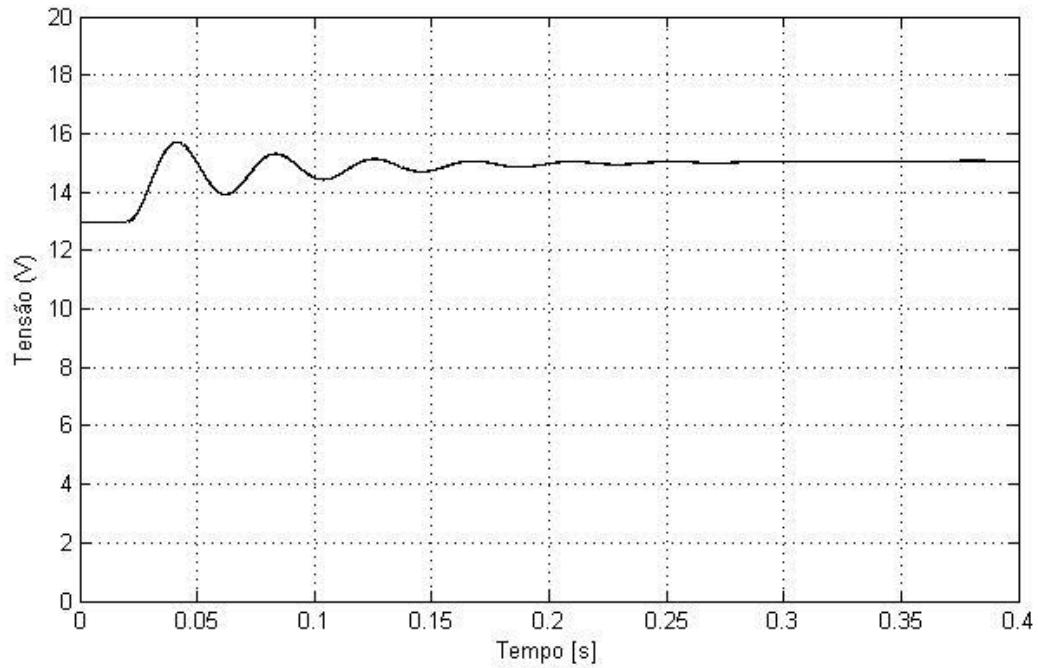


Figura 35: Forma de onda da tensão na carga, após conversor redutor c.c.-c.c.

Nas duas Figuras anteriores, 34 e 35, visualizam-se as formas de onda na carga, isto é, tensão e corrente de alimentação da bateria. Nota-se uma ótima estabilidade na forma de onda de tensão. Para a forma de onda da corrente, verifica-se uma alteração nos valores em relação à simulação anterior, pelo facto da resistência de carga associada à bateria ter o valor de 2 m Ω e não 1 Ω , para poder perceber o comportamento com um valor de resistência diferente.

Na Figura 36, apresenta-se o comportamento da bateria através de três gráficos, *SOC* – Estado de carga, em %, corrente, em A, e tensão, em V. O estado de carga inicial da bateria foi de 80 %, notando-se um consecutivo e ligeiro aumento até 80,5 %, entre 0 s e 1 s de simulação. Quanto à corrente, esta apresenta-se semelhante à Figura 34, conforme seria de esperar. A tensão na bateria aumenta para 15 V portanto o circuito apresenta-se em condições de funcionamento adequadas.

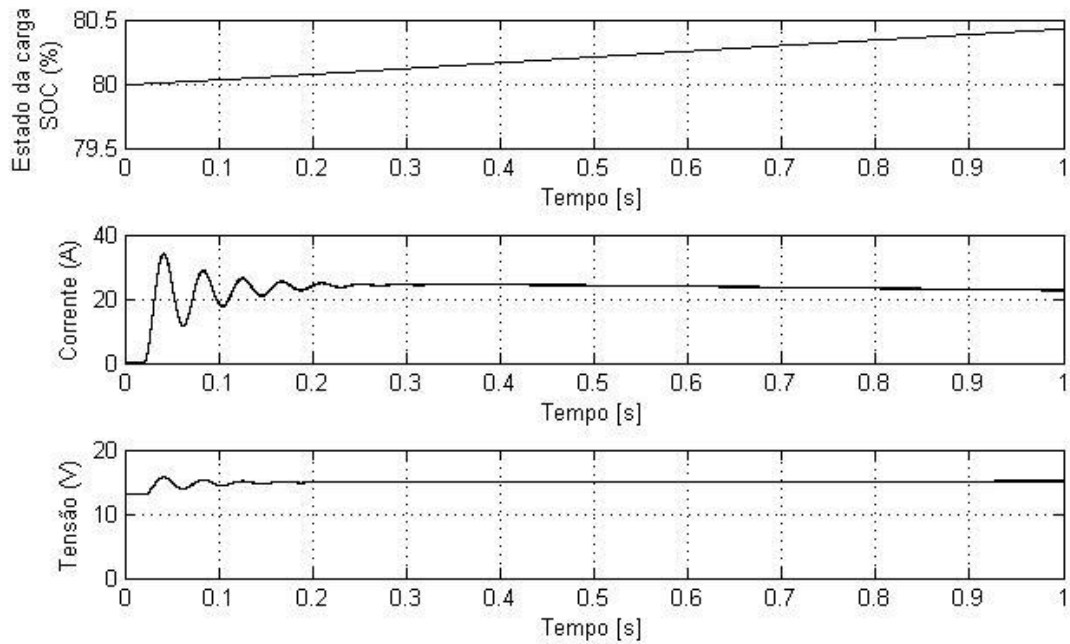


Figura 36: Formas de onda da bateria 25 V

Ainda com a versão de circuito enunciada na Figura 33, foram elaborados ensaios com objetivo de se assemelhar com a perspectiva real do projeto. Desta forma irá ser feita uma variação na amplitude da tensão de entrada. Ao simular uma amplitude com valores inferiores aos definidos anteriormente, isso traduzirá um esforço menor de produção de energia mecânica. Por outro lado, a simulação de amplitudes mais elevadas traduzirá uma elevação da produção de energia mecânica. A análise das duas variações deve ser analisada, no sentido de balizar tensões admissíveis de funcionamento do sistema.

Na Figura 37 estão ilustradas as formas de onda na carga para uma tensão na fonte de 22 V.

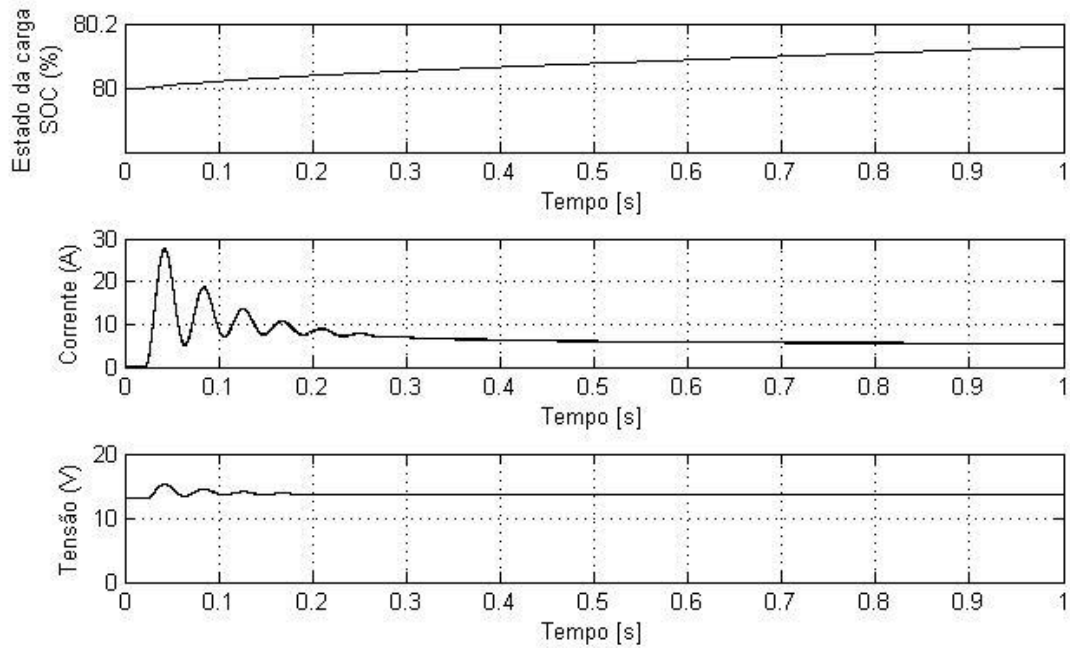


Figura 37: Formas de onda da carga para valores de 22 V na fonte

A tensão de 22 V é a mínima admissível da fonte do circuito para que a carga receba em boas condições energia elétrica. Assim como na simulação anterior, o estado da carga inicial foi 80 %, notando-se um aumento menos acentuado quando comparado com a Figura 40, entre 0 s e 1 s de simulação, aumentou até 80.2 %. Quanto à corrente, os valores estão inferiores a 10 A. Para a tensão os valores estão relativamente inferiores a 15 V. Na figura anterior está traduzido um funcionamento adequado, no entanto limitado.

Na Figura 38, a tensão da fonte foi $V_{ef} = 28$ V, sendo este o limite superior admissível para que na carga a tensão e corrente não sejam demasiado elevadas ao ponto de danificar os elementos do circuito.

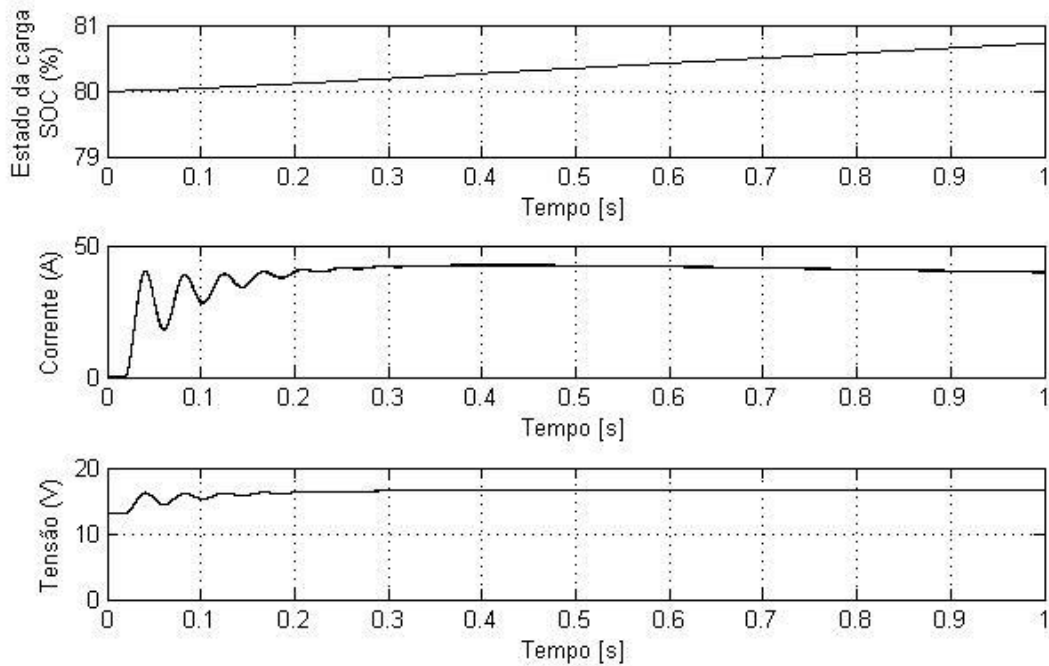


Figura 38: Formas de onda da carga para valores de 28 V na fonte

Na Figura 38, é visível o estado de carga da bateria – *SOC* (%), notando-se um aumento considerável durante o período de simulação. De 0 s a 1 s, aumentou de 80 % para 81 %. Para a corrente nota-se um acentuado aumento comparativamente aos ensaios anteriores, que podem traduzir-se em danos para os componentes de circuito, nomeadamente a bateria. A tensão manteve-se estável, mas superior a 15 V. A partir deste valor de tensão na fonte poderá ocorrer falhas e danos, portanto este será o limite superior admissível.

Após os ensaios anteriores foi possível balizar a tensão de funcionamento do gerador entre 22 V e 28 V, sendo que idealmente o seu funcionamento deve ser com uma tensão de 25 V.

Na Figura 39, o esquema representado inclui o gerador trifásico, o retificador trifásico, conversor c.c. redutor e resistência, para simulação de um circuito puramente resistivo. Para um funcionamento mais estável do circuito foi incluída uma carga em estrela no gerador. Este circuito nomeia-se de “VF_02” e está disponível para consulta.

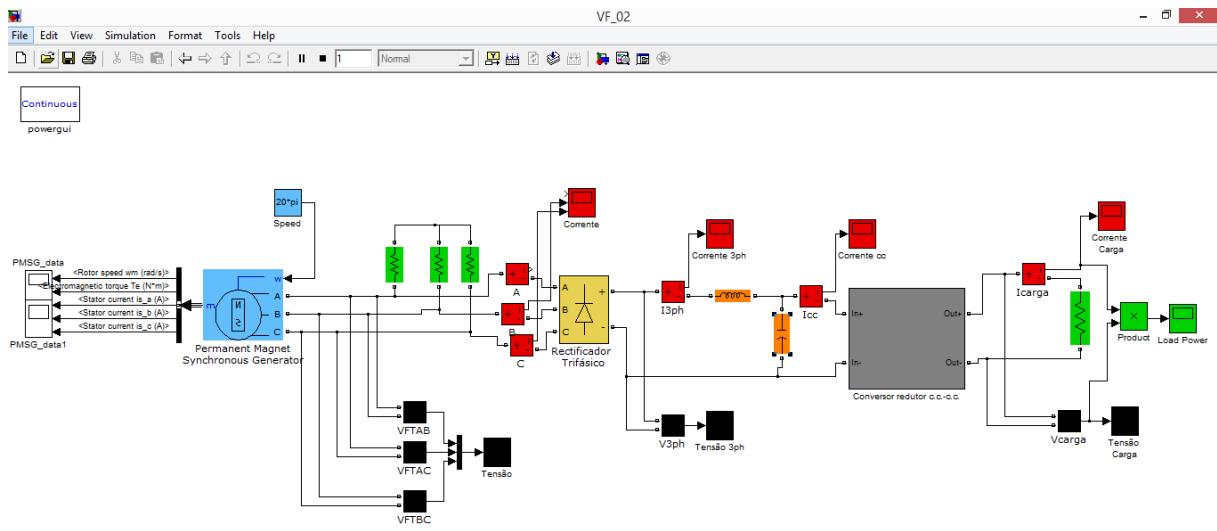


Figura 39: Esquema elétrico com gerador trifásico e resistência

Nas simulações elaboradas foi utilizado o bloco *Permanent Magnet Synchronous Machine: PMSM*, que pode funcionar como motor ou gerador, neste caso em específico gerador [28]. Este modela uma máquina síncrona de ímãs permanentes de onda sinusoidal.

A parametrização do bloco em *SIMULINK-MatLab* teve como base as características enunciadas na Tabela 7, sobre as quais foram efetuados cálculos. Além disso foi utilizada documentação técnica de equipamentos semelhantes – *datasheets* [27] [29] [30].

O parâmetro determinado através de cálculos corresponde a *Flux linkage established by magnets (V.s)* e está representado na equação (Eq.29):

$$V.s = \frac{V_{pp}}{S_{rad/s}} \quad (\text{Eq.29})$$

Nesta simulação a mola foi considerada com uma velocidade constante de 600 rpm que equivale a 62,8319 ou $20 \cdot \pi$ rad/s.

Na Figura 40 está ilustrada a simulação do gerador isolado dos restantes componentes para que se pudesse entender convenientemente as curvas originadas. Com esta simulação compreendeu-se que incluir uma carga resistiva em estrela no gerador, estabiliza as formas de onda à saída do mesmo.

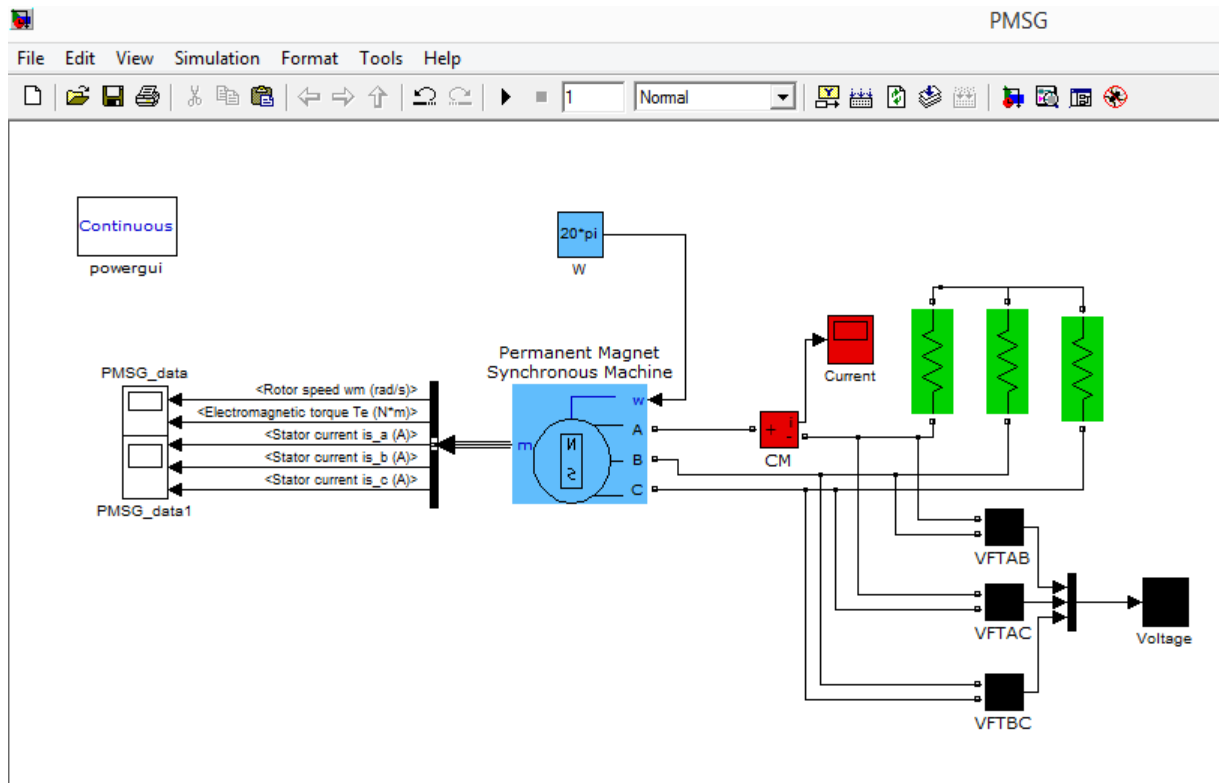


Figura 40: Simulação do Permanent Magnet Synchronous Generator: PMSG

Na Figura 41 está ilustrada a forma de onda da corrente aos terminais do gerador dimensionado.

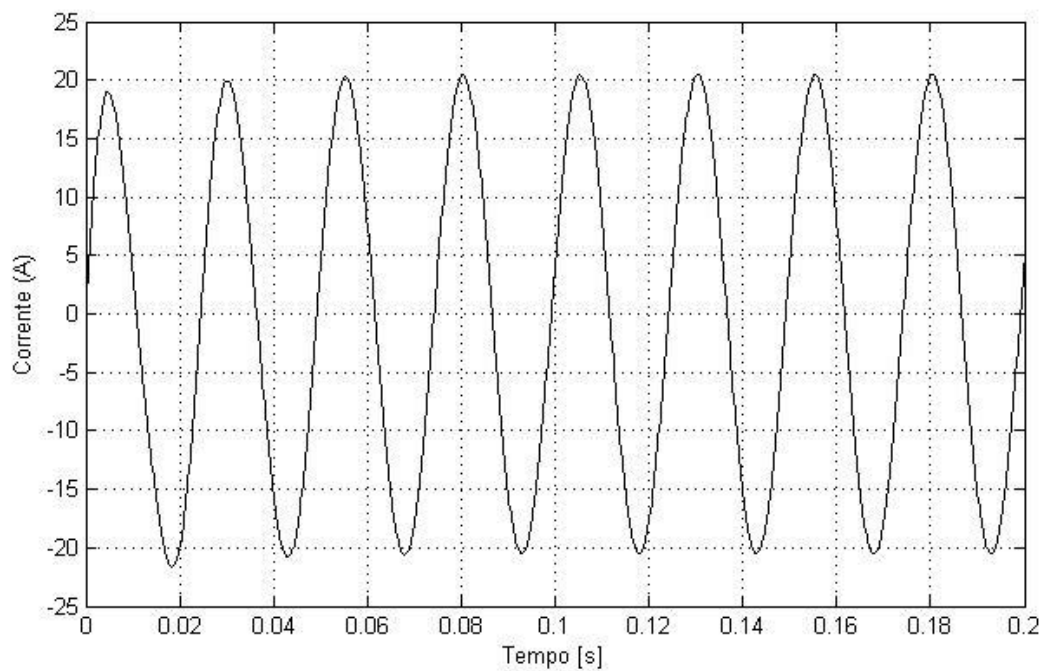


Figura 41: Forma de onda da corrente aos terminais do gerador – PMSG

Na Figura 42, ilustram-se as formas de onda da tensão aos terminais do gerador, entre as várias fases. Ambas as figuras mostram que as formas de onda apresentadas possuem valores admissíveis de funcionamento.

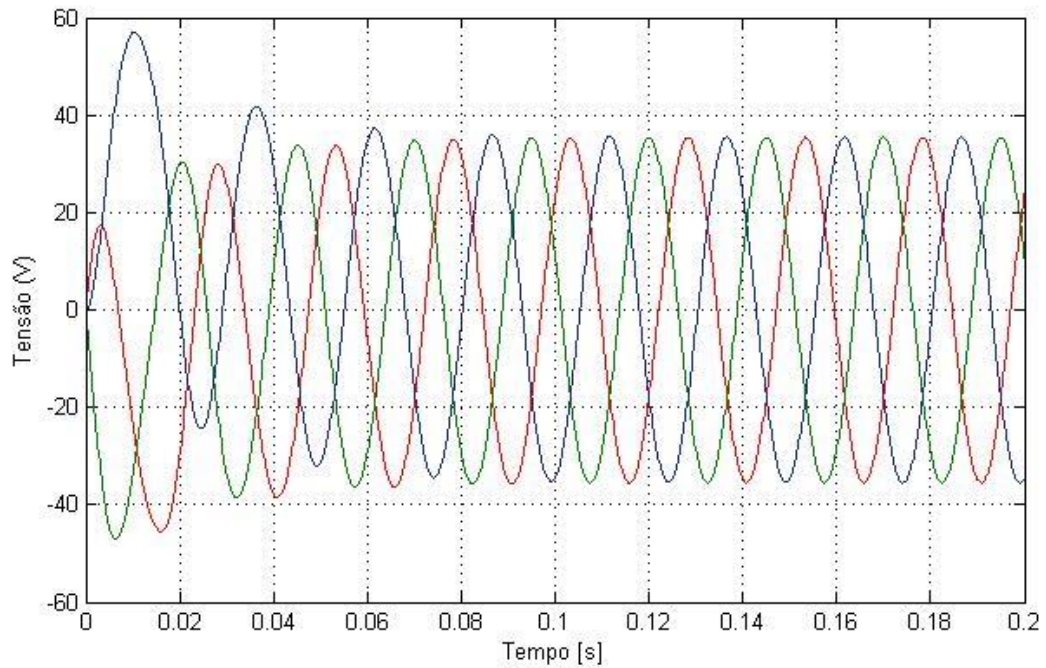


Figura 42: Forma de onda da tensão aos terminais do gerador – PMSG

Integrando o bloco anteriormente estudado no restante circuito podemos obter o circuito denominado em anexo por “VF_02”, constituído pelo circuito elétrico com gerador e uma carga resistiva, ilustrado na Figura 39.

Nas próximas Figuras 43, 44 e 45 estão representadas várias formas de onda na carga do circuito.

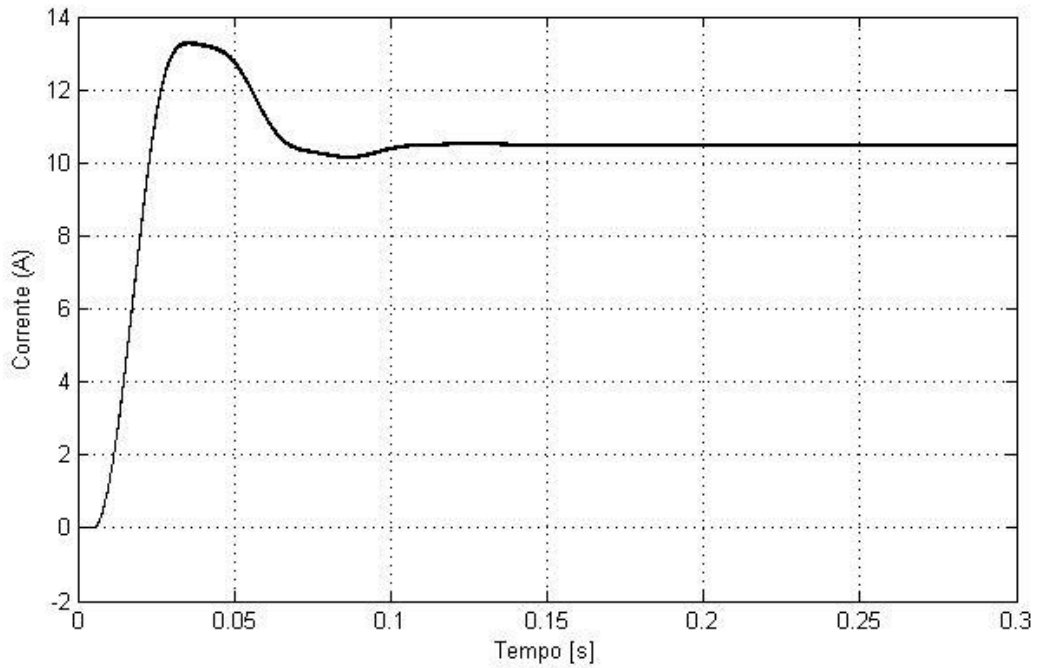


Figura 43: Forma de onda da corrente na carga, $R=1 \Omega$

Na Figura 44 está representada a forma de onda da tensão na carga. Apresenta um valor ligeiramente inferior a 12 V. Apesar de não estar atingido o valor desejado, 12V, este é bastante próximo. Esta diferença está relacionada com o valor de resistência associado e também valor de corrente. Para serem notórias as melhorias nestas formas de onda, será necessário reformular o dimensionamento da bateria, ou por outro lado, uma nova análise ao sistema para ser possível perceber porque o valor de corrente está mais abaixo do pretendido.

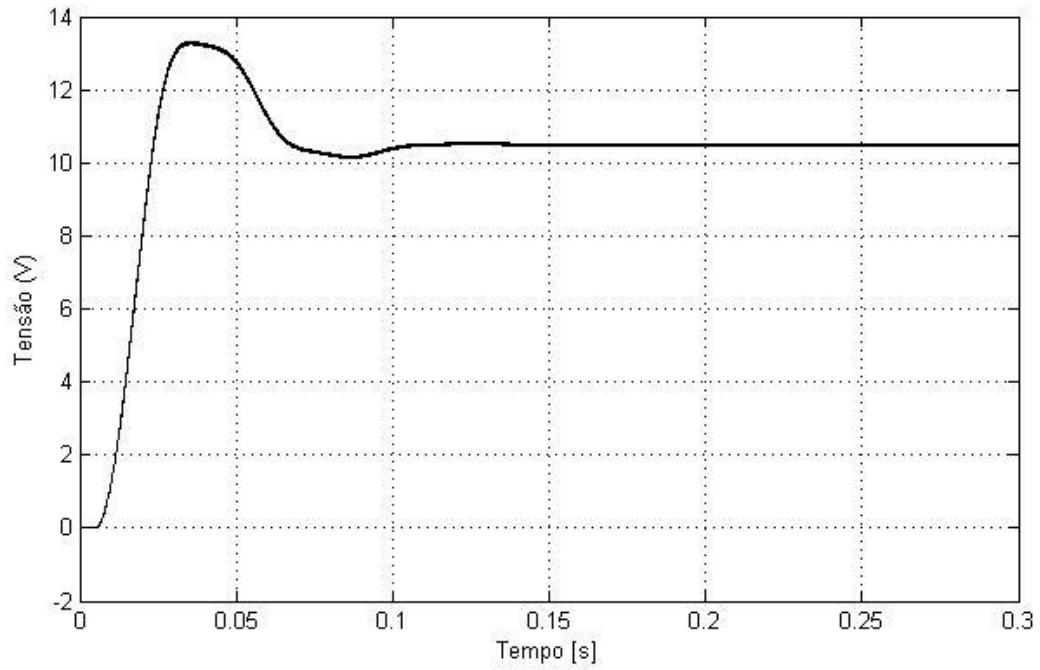


Figura 44: Forma de onda da tensão na carga, $R=1 \Omega$

Na Figura 45, ilustra-se a forma de onda da potência na carga, que visivelmente não corresponde ao desejado, uma vez que é ligeiramente inferior a 140 W. Este fenómeno era já de esperar uma vez que o valor de tensão foi também inferior ao desejado.

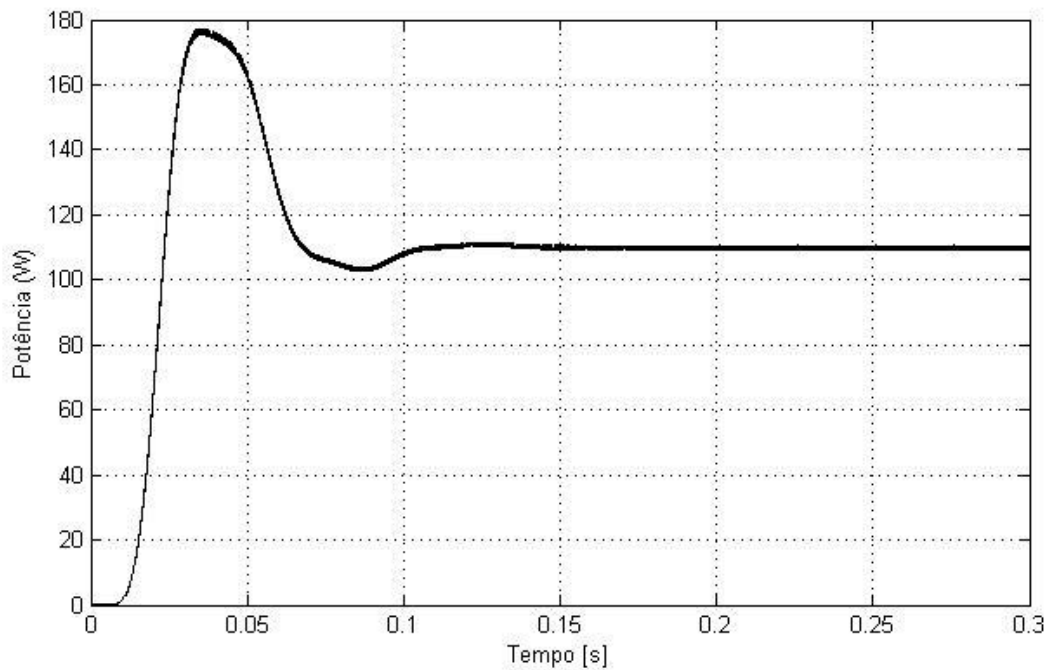


Figura 45: Forma de onda para a potência na carga, $R=1 \Omega$

Por fim, atualizando o circuito estudado, nomeado de “VF_03”, para funcionamento com o gerador e bateria, obtém-se o *layout* da próxima Figura 46, cujas formas de onda serão evidenciadas em dois momentos distintos do circuito.

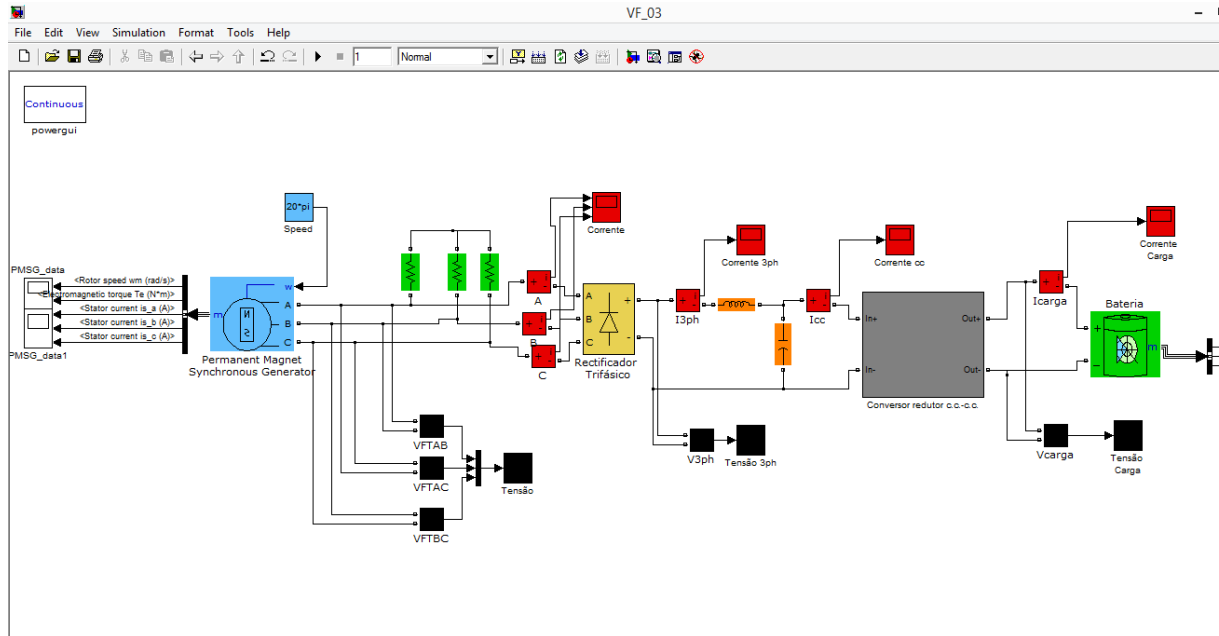


Figura 46: Esquema elétrico com gerador trifásico e bateria

Na Figura 47, estão representadas as formas de onda da corrente das diversas fases à saída do gerador. Apresentam um período transitório inicial, no entanto é evidente o desfasamento entre elas.

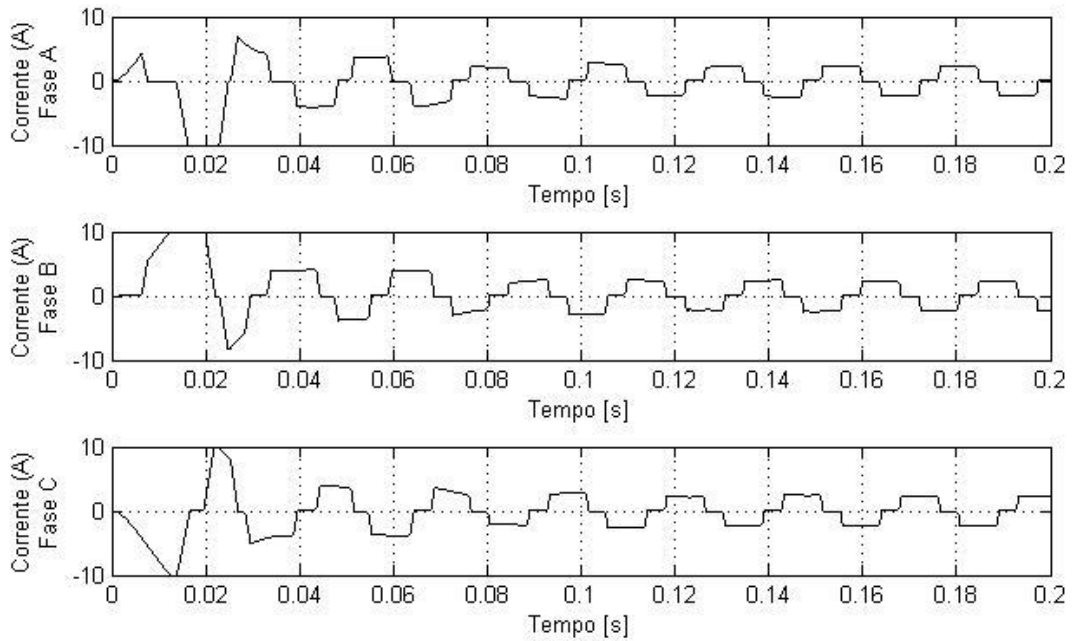


Figura 47: Formas de onda da corrente à saída do gerador trifásico

Na próxima Figura 48, serão apresentadas as formas de onda da tensão à saída do gerador. Esta apresenta um período transitório até 0.1 s, no entanto depois estabiliza e assemelha-se à forma de onda da Figura 42, como seria de esperar.

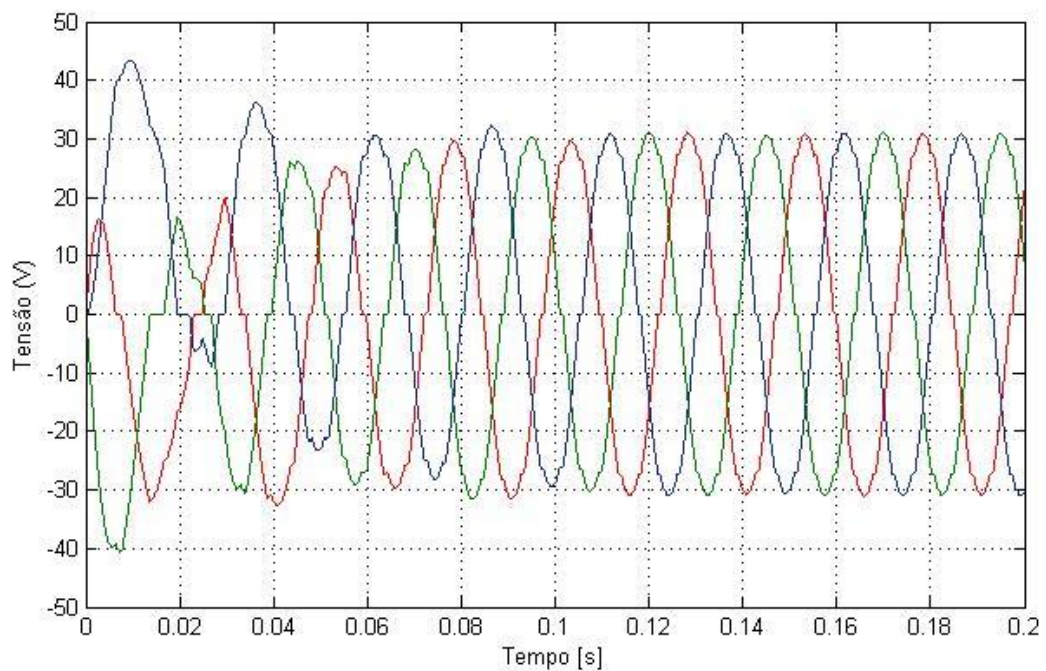


Figura 48: Forma de onda da tensão à saída do gerador

Na Figura 49 ilustram-se as formas de onda da caracterização da bateria. Analisando a figura, é possível entender que estas formas de onda, representam um funcionamento adequado do sistema.

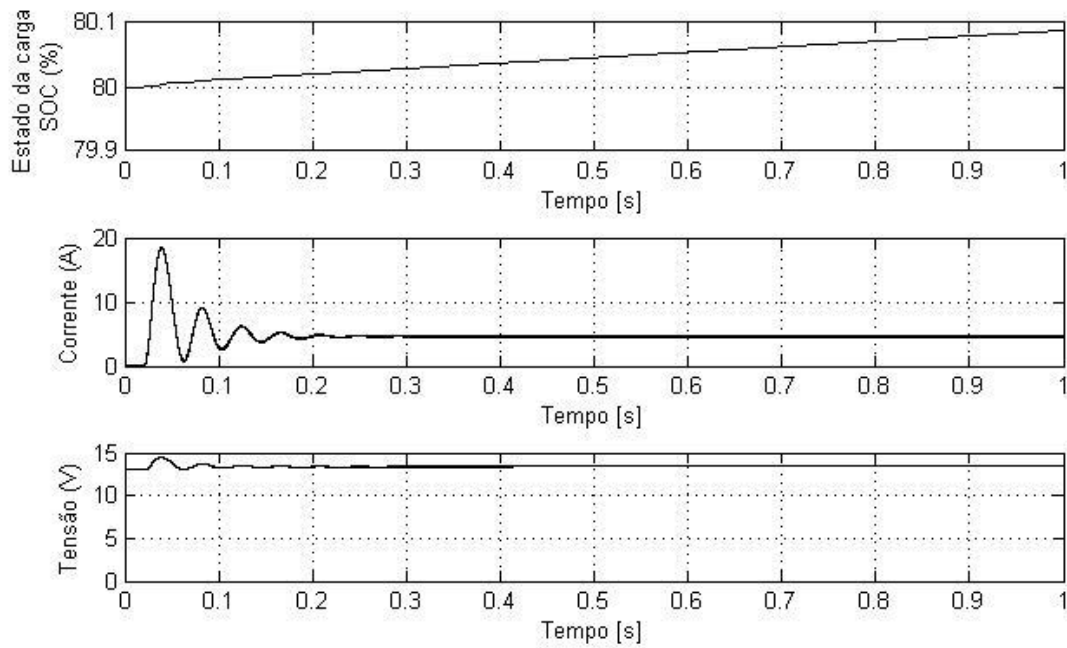


Figura 49: Formas de onda da bateria

Na Figura 49 através de três gráficos verifica-se que o estado da carga inicial foi 80 %, notando-se um aumento pouco acentuado até 80.1 %, entre 0 s e 1 s de simulação. Quanto à corrente os valores são aproximados a 5 A e para a tensão os valores estão relativamente inferiores a 15 V, o que se traduz num funcionamento adequado do sistema.

Através das simulações anteriores, pudemos comprovar o funcionamento do sistema sob o ponto da projeção feita no Capítulo 3.

Capítulo 6 – Material adquirido para implementação do sistema

Este capítulo faz uma breve explicação do material adquirido no mercado para o desenvolvimento do projeto.

6.1. Material Adquirido

Os módulos adquiridos são os nomeados na lista em baixo, Tabela 8 e a sua interligação está documentada no texto em baixo.

Tabela 8: Material Elétrico adquirido

Designação
1. Gerador de Energia AC/DC a Dínamo e Pedais, Ref.69-457
2. DC-DC Converter / Comercial, Ref. COR12D
3. Gerador Trifásico de 400 W
4. Three-phase Rectifier AC-DC Converter, Cód. 9098917
5. DC-DC Converter (buck) / PCB, Cód. 1995991
6. Charge Controller Wellsee 12/24V 30A
7. Painel Fotovoltaico (PV) SW80 - 80W 12V Poli
8. Bateria UCG 20 Ah (12 V)
9. DC-AC Converter, CONVERSOR 12VDC P/230VAC 600W, Ref. AP9127341

O item número 1: Gerador de Energia AC/DC a Dínamo e Pedais, Ref.69-457, ilustrado na Figura 50 interliga autonomamente com os dispositivos eletrónicos de baixa potência a alimentar, por exemplo telemóvel, *smartphone*, *tablet*, máquina fotográfica. Por outro lado, pode desacoplar-se os pedais e acoplar-se a mola e respetiva caixa, Figura 51 e 52, para o acionamento de rotação no motor, com conseqüente produção de energia.



Figura 50: Powerplus

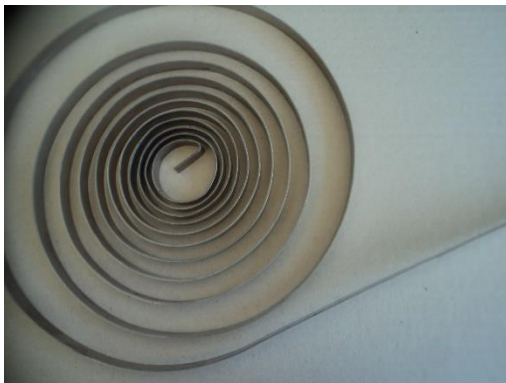


Figura 51: Mola Espiral dimensionada para o projeto

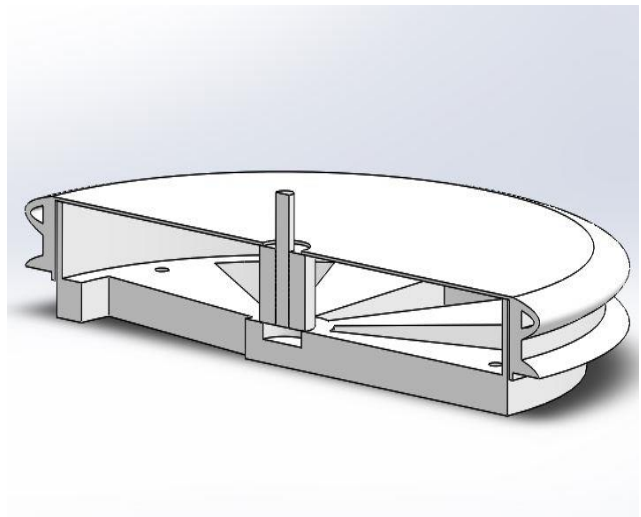


Figura 52: Caixa da mola

A posição 2 da Tabela 8 corresponde a um conversor CC-CC comercial, que fará a conversão de 12 V recebidos da bateria para 3-5 V. Este conversor está equipado com saídas micro USB e mini USB com finalidade de alimentar dispositivos eletrônicos, Figura 53.



Figura 53: DC-DC comercial

O retificador trifásico, item número 4, ilustrado na Figura 54, tem como função retificar a corrente vinda do gerador trifásico, item número 3.



Figura 54: Three-phase Rectifier AC-DC Converter

O item número 5 está ilustrado na Figura 55, é um conversor c.c.-c.c. e servirá para adaptar ao retificador trifásico, item número 4 da Tabela 9. Fará a ligação entre o retificador trifásico e bateria, item número 8.

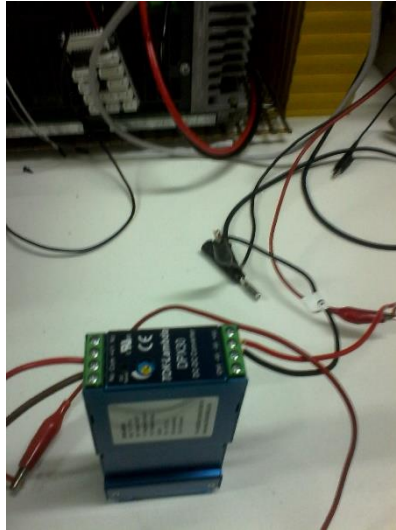


Figura 55: DC-DC Converter

Os itens número 6 e 7 correspondem ao sistema de produção de energia elétrica através da luz solar, Figura 56, ilustra o painel solar enquanto a Figura 55 ilustra o controlador de carga para ligação à bateria. Adicionalmente ao sistema de pedais e mola, irão produzir energia elétrica para acumulação em bateria e posterior alimentação de dispositivos.



*Figura 56: Painel Fotovoltaico (PV)
SW80 - 80W 12V Poli*



*Figura 57: Charge Controller Wellsee
12/24V 30A*

O item número 9, CC-CA Converter, CONVERSION 12VDC P/230VAC 600W, Ref. AP9127341, ficará conectado com a bateria, item número 8 e fará a conversão da tensão contínua para tensão alternada, de forma a se puder alimentar os dispositivos eletrônicos através de uma ficha CA, quando assim for necessário. Está ilustrado na Figura 58.



Figura 58: DC-AC Converter, CONVERSOR 12VDC P/230VAC 600W

6.2. Caracterização económica real

No Capítulo 3, está demonstrada uma estimativa dos custos de aquisição de material e equipamentos para o desenvolvimento do projeto. O valor obtido da auscultação do mercado foi de 835 €. Neste capítulo é possível constatar quais são os custos associados à construção da plataforma, relativo ao equipamento elétrico, uma vez que é feita a caracterização do material adquirido. Dados relativos aos custos estão expostos na próxima Tabela 9.

Tabela 9: Custos reais dos equipamentos do projeto

Designação do equipamento	Custo (€, inclui IVA)
1. Gerador de Energia AC/DC a Dínamo e Pedais, Ref.69-457	169,90
2. DC-DC Converter / Comercial, Ref. COR12D	14,90
3. Gerador Trifásico de 400 W	300
4. Three-phase Rectifier AC-DC Converter, Cód. 9098917	18,90
5. DC-DC Converter (buck) / PCB, Cód. 1995991	14,90
6. Charge Controller Wellsee 12/24V 30A	69
7. Painel Fotovoltaico (PV) SW80 - 80W 12V Poli	95
8. Bateria UCG 20 Ah (12 V)	42
9. DC-AC Converter, CONVERSOR 12VDC P/230VAC 600W, Ref. AP9127341	116,37

Através da tabela anterior podemos verificar o custo aproximado do desenvolvimento da plataforma se aproxima de 840 €, portanto bastante próximo do valor estimado como seria de esperar. No entanto, nesta tabela não estão incluídos os custos associados à construção da estrutura envolvente e da componente mecânica, portanto é expectável que os custos associados à construção desta plataforma aumentem 60 % a 80 % dos valores referidos anteriormente.

Capítulo 7 – Viabilidade do projeto e conclusão

7.1. Viabilidade do projeto

Este documento corresponde à caracterização técnica de um projeto especialmente comercial e inovador. Com o nome *SelfVolt*, este projeto poderá torna-se um novo conceito de mobiliário urbano. O facto de ter capacidade de produção de energia elétrica para alimentar dispositivos eletrónicos e também alguns dispositivos de interatividade interna permite que possa ser colocado em qualquer lugar, sem que seja necessário a ligação à rede elétrica. Assim, é possível satisfazer uma necessidade real, de alimentação de dispositivos eletrónicos em locais de difícil acesso à rede elétrica.

Por via de um *design* harmonioso, Figura 59, proporciona em ambientes *indoor* ou *outdoor* um ponto de alimentação para pequenos dispositivos eletrónicos (*tablets*, *smartphones*, *notebooks*, entre outros).



Figura 59: Layout final do projeto

Adicionalmente poderá providenciar acesso gratuito à Internet via *Wi-Fi/Hotspot*. Pode integrar um ou dois monitores que permitem interatividade com o utilizador, por permitir a consulta de, por exemplo, informações turísticas, culturais e meteorológicas, ou outras que se possam considerar interessantes.

O *design* concebido permite que a sua integração seja adequada em diversos ambientes, como ilustrado na Figura 60. Assim, é possível uma construção mais uniforme tornando possível a sua fabricação em série e por conseguinte uma redução nos custos de produção.



Figura 60: Adequação a vários ambientes

Este projeto, enquanto conceito e ideia foi submetido a diversos concursos, tendo sido premiado por diversas entidades. Os prémios atribuídos foram: “*Câmara Municipal de Coimbra*”; “*Coimbra Inovação Parque*”; “*Parque Tecnológico de Óbidos*”; “*ANJE-Tech-Entrepreneurship*”; “*Garantia Mútua*”. Foi também apoiado, desde 2013, pelo IAPMEI, através de um “*Passaporte para o Empreendedorismo*”.

7.2. Conclusão

Nas páginas anteriores foi descrito o projeto de desenvolvimento de uma plataforma de produção e acumulação de energia. Desde a análise inicial do diagrama de blocos funcional, até parametrização e simulação final, foi feita uma descrição do projeto, que posteriormente poderá ser validada. Na secção seguinte é possível entender quais podem ser os próximos passos a desenvolver neste projeto, de forma a efetuar uma confirmação da funcionalidade do sistema.

As dificuldades que surgiram ao longo do desenvolvimento do projeto foram a barreira inicial de definir o plano de trabalho concreto, assim como identificar convenientemente o estado da arte existente. Adicionalmente, o tempo disponível para o desenvolvimento do projeto foi bastante limitado dado que a autora é trabalhadora-estudante, sendo diversas vezes complicado conciliar horários com os seus orientadores, sendo esta a causa principal para o insucesso do projeto.

No contexto atual esta plataforma pode ter várias aplicações, nomeadamente em locais direcionados para o lazer, onde facilmente se está disposto a despende de esforço físico.

A concretização do projeto é possível, mediante a disponibilização inicial de algum capital, sendo que se estima que cada unidade piloto tenha um custo inicial entre 2000 € e 2500 €. Em contacto com o departamento técnico de *We Watt: Pure Human Power* foi possível apurar que uma plataforma deste tipo tem um custo médio de produção de aproximadamente 3500 €.

Ao apurar este valor, é possível perceber que de facto esta plataforma se poderia construir e tornar comercial. Uma forma de tornar este projeto viável seria utilizar a estrutura envolvente

para colocação de publicidade. Desta forma, o *payback* seria reduzindo, podendo em determinados locais e/ou circunstâncias ser apenas de três meses.

7.3. Proposta de trabalhos futuros

É possível através deste relatório concluir que o trabalho desenvolvido é inconclusivo e incompleto pelo que diversas tarefas podem ser definidas para o futuro.

Como tarefas seguintes proponho que seja dada continuidade a análise *MatLab* dos subsistemas, isto é, sistema mecânico e devida influência do controlo do conversor c.c.-c.c.. De seguida proponho que seja analisada a configuração de ligação dos diversos componentes e a bateria. Consecutivamente, e para ser possível efetuar uma confirmação do projeto proponho a integração total dos sistemas através de uma simulação em *MatLab*. Por fim, baseado nos resultados obtidos na simulação integral do sistema, ilustrado na Figura 8, sugiro que seja utilizado o material adquirido para a construção de um protótipo.

Numa fase posterior e após confirmados os parâmetros de funcionamento do sistema integral, poderíamos avançar para a produção de amostras B e C, para que a médio-longo prazo, fosse possível introduzir o produto no mercado dependendo da aceitação do mesmo.

Bibliografia

- [1] J. M. Urriza, B. A. Novelli, J. C. B. Leite e J. D. Orozco, “Economia de Energia em Dispositivos Móveis,” *Instituto de Computação, Universidade Federal Fluminense*.
- [2] “123RF Portugal,” [Online]. Available: http://es.123rf.com/photo_14412704_dispositivos-electronicos-de-telefonos-inteligentes-y-hogar-conectado-al-servidor-de-la-nube-nota-to.html. [Acedido em 17 11 2015].
- [3] W. L. Moyers e H. S. Coombe, “Harvesting Energy with Hand-Crank Generators to support dismounted Soldier Missions,” Power Generation Branch.
- [4] W. Hess, “Hand Crank Weather Channel Receiver with cell Phone Charger”. United States Patente 7,239,237 B2 , 3 July 2007.
- [5] G. Augusti Negri, “Coletivo Verde,” [Online]. Available: <http://www.coletivoverde.com.br/sobre-o-coletivo-verde/>. [Acedido em 17 11 2015].
- [6] R. Suhalka, M. C. Khandelwal, K. K. Sharma e A. Sanghi, “Generation of Electrical Power using Bicycle Pedal,” *International Journal of Recent Research and Review*, 2014.
- [7] “Author Blog,” [Online]. Available: <https://juracybahiablog.wordpress.com/2015/09/18/energia-sobrando/>. [Acedido em 21 11 2015].
- [8] “We Watt: Pure Human Power,” [Online]. Available: <http://wewatt.be/>. [Acedido em 17 11 2015].
- [9] O. H. Ando Junior, M. A. J. Coelho, C. F. Malfatti e V. J. Brusamarello, “Proposal of a Micro Generator Piezoelectric for Portable Devices from the Energy Harvesting,” em *Internacional Conference on Renewable Energies and Power Quality* , Cordoba, 2014.
- [10] “Energy Floors,” [Online]. Available: <http://www.sustainabledanceclub.com/>. [Acedido em 17 11 2015].
- [11] G. –. D. E. Contents, “Green Savers,” [Online]. Available: <http://greensavers.sapo.pt/>. [Acedido em 17 11 2015].
- [12] G. –. D. E. Contents, “Green Savers,” [Online]. Available: <http://greensavers.sapo.pt/2015/11/19/sola-vai-permitir-gerar-energia-para-carregar-os-nossos-gadgets/>. [Acedido em 21 11 2015].
- [13] Â. P. B. d. S. Ferreira, “Projecto de uma Máquina de Ímanes Permanentes de Fluxo Axial Orientado para os Sistemas de Conversão de energia Eólica,” FEUP, Porto, 2011.

- [14] A. E. Fitzgerald, C. K. Jr. e S. D. Umans, Máquinas Elétricas - Com introdução à eletrônica de potência 6ª Edição, BookMan, 2006.
- [15] J. Vithayathil, Power Electronics . Principles and Applications, California: McGraw-Hill, Inc., 1995.
- [16] P. T. Krein, Elements of Power Electronics, New York: Oxford University Press, 1998.
- [17] J. P. Agrawal, Power Electronic Systems - Theory and Design, Prentice Hall, 2001.
- [18] N. Mohan, T. M. Undeland e W. P. Robbins, Power Electronics - Converters, Applications and Design, John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [19] S. Ang e A. Oliva, Power-Switching Converters, New York: Taylor & Francis Group, 2011.
- [20] M. H. Rashid, Eletrônica de Potência: Circuitos, Dispositivos e aplicações, 1993.
- [21] H. Choi, “Practical Feedback Loop Design Considerations for Switched Mode Power Supplies,” em *Fairchild Semiconductor Power Seminar*, Seoul, 2010-2011.
- [22] M. Jongerden e H. B.R., “Battery Modeling,” Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science (EEMCS), 2008.
- [23] C. Porniuncula, “Aplicação de Modelos Elétricos de Bateria na Predição do Tempo de Vida de Dispositivos Móveis,” 2012.
- [24] O. Tremblay, “Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications,” *World Electric Vehicle Journal* , vol. Vol.3, 2009.
- [25] M. Daowd, N. Omar, B. Verbrugge, P. Van Den Bossche e J. Van Mierlo, “Battery Models Parameter Estimation based on Matlab/Simulink,” em *The 25th World Battery, hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition*, China, 2010.
- [26] K. Gieck e R. Gieck, Manual de fórmulas técnicas, Lisboa: Dinalivro, 1996.
- [27] C.-M. Ong, Dynamic Simulation of Electric Machinery - Using MatLab/Simulink, New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- [28] A. Rolán, L. Álvaro, V. Gerardo e A. Daniel, “Modeling of a Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator,” em *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Seoul, 2009.
- [29] H. Hofmann e B. Hieb, “Characterizing and Validating a Permanent Magnet Synchronous Motor Model,” MathWorks.
- [30] S. -. P. Generation, “HCI 534F/544F - Technical Data Sheet”.
- [31] G. Niemann, Elementos de Máquinas, 1993-1996.
- [32] E. Bini, I. D. Rabello e M. Pugliesi, Tolerâncias, rolamentos e engrenagens, 1975.
- [33] *Introdução ao projeto mecânico*. [Filme]. DEM-UC.

Anexos

Anexo I – Projeto mecânico: Considerações técnicas para o projeto

Na sequência do desenvolvimento do sistema eletromecânico de produção e acumulação de energia elétrica foi constatada a necessidade de sinergia com um elemento de engenharia mecânica. Esta carência foi verificada após análise e estudo das necessidades do projeto, detetando a inexistência da estrutura mecânica desejada no mercado e daí a necessidade da criação de uma solução à medida.

Para o dimensionamento e desenvolvimento do projeto mecânico foi realizado um debate entre todos os intervenientes no processo, de forma a definir objetivos finais e objetivos por etapas a elaborar para o trabalho final. Especificamente na componente mecânica, o objetivo final consiste no dimensionamento e construção de uma estrutura que através de um movimento oscilante rotativo, faça acionar uma mola mecânica ou outro sistema de armazenamento de energia, que por consequência da força acumulada mova um grupo de engrenagens multiplicadoras/desmultiplicadoras para acionamento de um gerador de ímanes permanentes, para produção de energia elétrica.

Para os primeiros dimensionamentos foram elaborados os esboços representados nas figuras 61, 62 e 63.

Na Figura 61 identifica-se um sistema biela-manivela em contacto com um veio superior permitindo rotação no sentido horário e anti-horário. A biela-manivela aciona a mola helicoidal de tração cuja transferência de energia mecânica se faz por via de correias e roldanas. Este sistema apresenta limitações no que toca à quantidade de energia produzida.

Na Figura 62 está ilustrado um sistema onde se identificam duas molas helicoidais de tração para uma maior quantidade da energia acumulada. As molas acionam um veio apoiado em rolamentos unidirecionais que permitem a sua rotação no sentido horário e anti-horário. A transferência de energia mecânica até ao gerador é feita através de correias e roldanas. Foi ponderada a existência de uma roda de inércia para aumentar a capacidade de transferência de energia.

Na Figura 63 o sistema ilustrado incorpora dois sistemas biela-manivela que funcionam em tempos distintos e contíguos de forma a permitir a rotação no sentido horário e anti-horário. É acionado um veio que através de uma roda de inércia transfere energia mecânica para as correias e rodas dentadas até ao gerador.

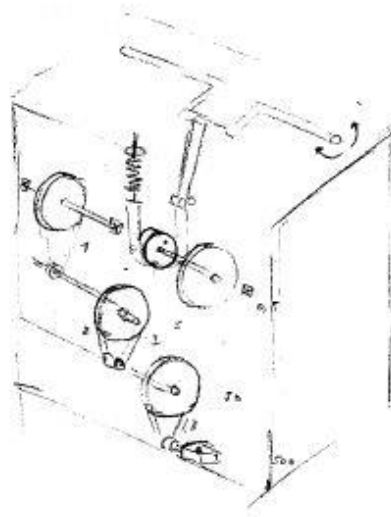


Figura 61: Sistema constituído por biela-manivela a acionar mola, para movimento das correias e roldanas

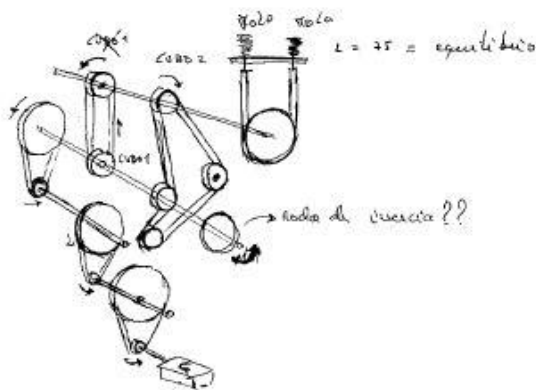


Figura 62: Sistema constituído por rolamentos unidirecionais mecânicos a acionar molas mecânicas para movimento das correias e roldanas

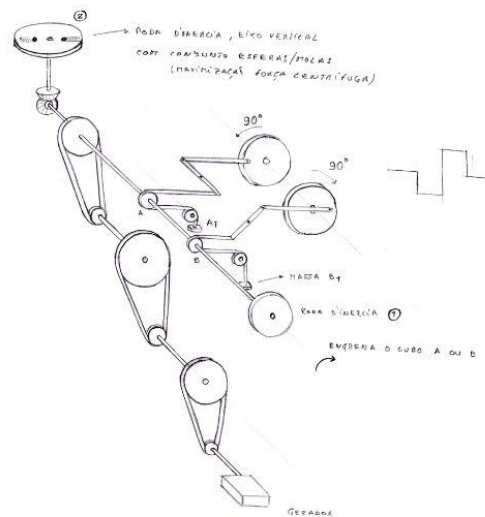


Figura 63: Sistema constituído por biela manivela a acionar uma roda de inércia e um sistema das correias e roldanas

Após análise de todos os sistemas descritos concluiu-se que o melhor sistema teria de ser constituído por uma mola mecânica, que diretamente conecta a um sistema de engrenagens, sem utilização de correias e roldanas, que multiplicam as rotações e acionam um gerador de ímanes permanentes. A seleção das correias e roldanas justificava-se pelo reduzido custo das mesmas face às engrenagens, mas rapidamente essa opinião foi alterada, pela comparação do rendimento dos dois mecanismos.

Para o desenvolvimento do projeto foi preciso considerar algumas especificações teóricas dos constituintes mecânicos, descritas de seguida.

As molas permitem o amortecimento e armazenando de energia (energia potencial). Ao serem descarregadas retomam a posição inicial libertando assim a energia armazenada. As várias funções que as molas podem exercer são as de armazenamento de energia, onde as molas são utilizadas para acionar relógios, carretéis, brinquedos ou mecanismos de retrocesso de válvulas e de aparelhos de controlo.

Quando se efetua o cálculo das molas é fundamental ter em consideração o tipo de solicitação a que as mesmas vão estar sujeitas. Para isso precisamos de as classificar segundo a principal solicitação a que são submetidas: molas de tração, de flexão, de torção e molas de borracha. Na seleção do tipo de mola a ser utilizada, é ainda importante saber alguns aspetos, considerados principais, assim como o espaço ocupado, peso e durabilidade. Em situações alternativas é necessário que sejam satisfeitas outras exigências, como por exemplo a conservação das propriedades elásticas, influência desprezível da massa da mola, atritos internos ou externos adicionais (amortecimento), relações especiais entre força aplicada e deformação.

O coeficiente de rigidez é utilizado no estudo das oscilações e do comportamento das molas sob a ação de choques. Quando constante, é também chamado de constante elástica da mola.

A mola selecionada para o projeto foi uma mola espiral plana (corda de relógio), Figura 64. Nesta mola, ambas as extremidades são fixas e as espiras não se sobrepõem umas às outras. As expressões aplicadas são as relativas às molas helicoidais de flexão.

A mola torna-se tanto mais “dura” quanto maior o número de espiras que se sobrepuserem durante o carregamento. [31]

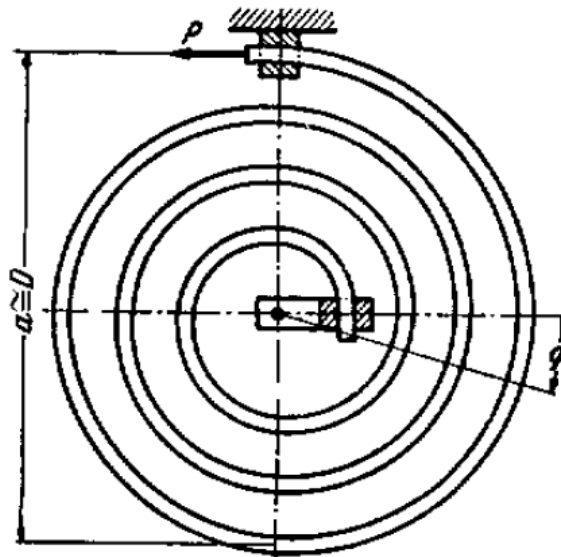


Figura 64: Esquema mola de espiral [31]

Quanto às engrenagens, representadas na figura 65, pode dizer-se que são um mecanismo formado por duas rodas dentadas. A sua construção está feita para que os dentes acoplem e contactem através de uma linha designada por evolvente, promovendo assim a transmissão do movimento. Quando duas rodas dentadas, de diferente diâmetro, engrenam entre si, à maior chama-se simplesmente roda e à menor, pinhão.

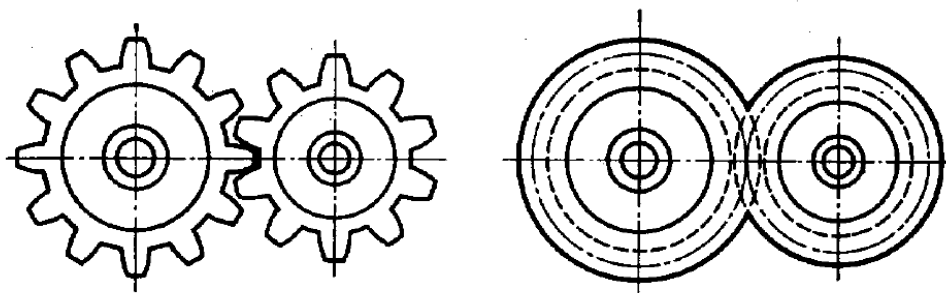


Figura 65: Engrenagens. Representação convencional [31]

Existem diferentes tipos de rodas dentadas, podendo ter dentado reto e com forma helicoidal. A transmissão de potência entre as rodas pode ocorrer no mesmo plano, no caso do dentado reto, ou entre planos inclinados, no caso de dentado helicoidal. Um caso particular de transmissão de movimento e potência são os parafusos sem-fim. No estudo de engrenagens é importante ter noção dos seguintes termos: cremalheira, circunferência primitiva, diâmetro primitivo, circunferência exterior, diâmetro exterior, ângulo de pressão, circunferência de fundo, partes do dente, dimensões das engrenagens e dos dentes, assim como o passo circular e módulo [32].

Em termos de rolamentos, é possível referir que para cada um existe um símbolo que determina a construção, as dimensões, as tolerâncias, a folga interna, entre outras.

O dimensionamento dos rolamentos/tamanho tem por base as suas capacidades de carga tendo em conta as cargas que terão de suportar e exigências de duração, condições de serviço e fiabilidade.

Normalmente a única causa de falha dos rolamentos, se estiverem asseguradas as condições de funcionamento, está relacionada com o número de rotações do veio, até ocorrer uma falha por fadiga. Quanto à configuração dos corpos rolantes, podemos classificar os rolamentos como sendo de esferas, rolos ou agulhas, podendo ter compensação axial [33].

De referir que tanto no caso das rodas dentadas como dos rolamentos, os fabricantes disponibilizam *software* de dimensionamento de utilização simples, tendo sido essa a opção utilizada neste trabalho.

Os rolamentos escolhidos para o projeto são da marca *SKF* e *Stieber*. Da marca *SKF*, temos as referências 619-7-2Z, 634-4-2Z, 638-4-2Z, 61801-2Z. Para a marca *Stieber* temos a referência AA 20.

Outro componente do projeto é o volante que se caracteriza por ser uma roda de grande massa, com fim de regularizar um movimento. Se uma força atuar sobre o seu eixo e provocar aceleração, o volante absorverá a energia dada e não aumentará a velocidade do giro a não ser pouco a pouco. Pelo contrário, se o eixo tender a parar por ter encontrado uma resistência momentânea, o volante cederá parte da sua energia e o movimento continuará, contudo baixando a velocidade.

Para o projeto, foi escolhido um volante de 0.5 m de diâmetro especialmente pelas características ergonómicas, proporcionando facilidade no desenvolvimento do movimento.

Até agora foram descritos os componentes de grande influência para o funcionamento do sistema mecânico isto é, a mola mecânica, engrenagens, rolamentos e volante. No entanto muitos outros componentes são imprescindíveis para um adequado funcionamento.

Quanto aos freios, estes são anéis de metal semi-flexíveis, com o objetivo de permitir a rotação de um mecanismo mas, ao mesmo tempo, impedir a sua movimentação lateral. São compostos por dois lados, um liso, instalado voltado para a peça. Um áspero, voltado para o exterior. Por

norma, estes anéis são feitos de aço carbono, aço inoxidável ou cobre berílio, podendo ter acabamentos para proteção contra corrosão, consoante o ambiente onde serão colocados.

Relativamente às chavetas, estas são um elemento mecânico fabricado em aço ou outro material, conforme as necessidades. Normalmente, a sua forma é retangular ou semicircular. A chaveta tem por finalidade ligar dois elementos mecânicos, travando-os ao mesmo tempo. Podem ser classificadas como sendo de cunha, paralelas ou de disco. Entretanto, chavetas de cunha podem também ser classificadas como longitudinais e transversais. Ainda dentro destas existem diferentes classificações consoante a aplicação requerida.

As principais aplicações dos parafusos são a fixação em uniões desmontáveis; a transmissão de forças, obtendo grandes forças axiais a partir de pequenas forças tangenciais; a transformação de movimentos retilíneos em rotativos e vice-versa; a proteção e obturadores para tapar orifícios. Consoante a aplicação do parafuso, existem diversos parâmetros a considerar.

Anexo II – Projeto mecânico: Detalhe do equipamento

A estrutura que suporta todo o sistema deverá ser constituída pelos itens enunciados a seguir, possíveis de ver na Figura 66 e 67.

1. Placa da Base (uma unidade);
2. Placas Laterais (duas unidades);
3. Placa Superior/topo (uma unidade);
4. Travamentos da estrutura, onze unidades, cada um com:
 - 4.1. Uma Base;
 - 4.2. Duas Anilhas M8;
 - 4.3. Duas Porcas M8;
 - 4.4. Dois Parafusos cónicos M8x25
5. Tampas de suporte aos veios/chumaceira/caixa de rolamentos treze unidades, cada uma com:
 - 5.1. Duas Anilhas M5;
 - 5.2. Duas Porcas M5;
 - 5.3. Dois Parafusos cónicos M5x20

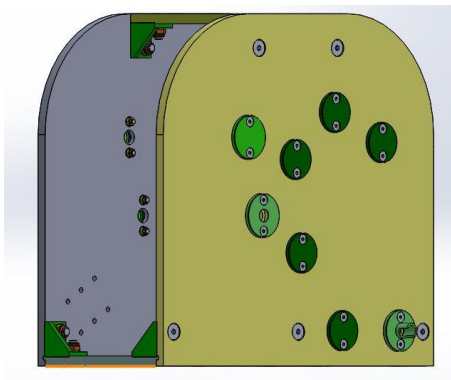


Figura 66: Estrutura de suporte do sistema

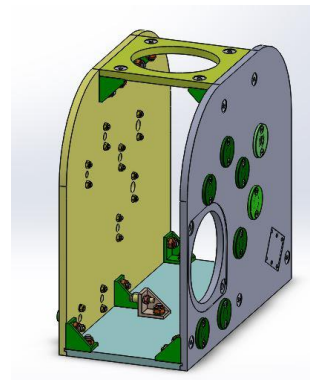
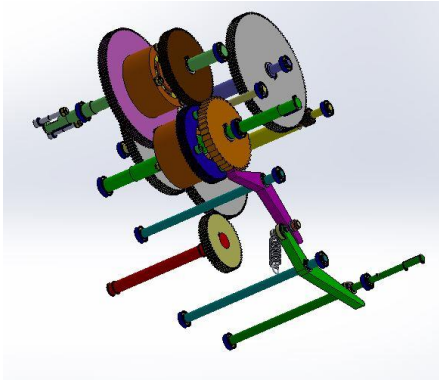
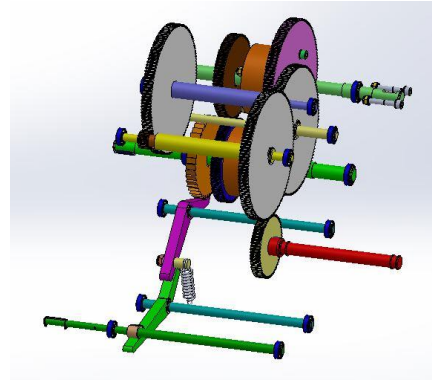


Figura 67: Estrutura de suporte do sistema

Esta estrutura está dimensionada para suportar outros elementos mecânicos que dão significado e função ao sistema, descritos de seguida, com identificação em nome e quantidade, ilustrado nas Figuras 68 e 69:

6. Veios, nove unidades, com diferentes componentes associados, consoante a função:

- 6.1. Catorze Rolamentos 619-7-2Z;
- 6.2. Um Rolamento 638-4-2Z;
- 6.3. Um Rolamento 634-4-2Z;
- 6.4. Dois Rolamentos AA 20;
- 6.5. Seis Rolamentos 61801;
- 6.6. Duas Chavetas 9-3-3;
- 6.7. Duas Chavetas 26-6-6;
- 6.8. Uma Chaveta 19-4-4;
- 6.9. Seis Chavetas 9-5-5;
- 6.10. Uma Chaveta 23-4-4;
- 6.11. Quatro Chavetas 15-2-2;
- 6.12. Uma Chaveta 18-5-5;
- 6.13. Uma Chaveta 9-2-2;
- 6.14. Uma Chaveta 19-2-2;
- 6.15. Quatro Freios 4;
- 6.16. Dois Freios 6;
- 6.17. Dezasseis Freios 7;
- 6.18. Quatro Freios 8;
- 6.19. Quatro Freios 10;
- 6.20. Dois Freios 11;
- 6.21. Quatro Freios 12;
- 6.22. Seis Freios 14;
- 6.23. Quatro Freios 20;
- 6.24. Dois Parafusos M5x50;
- 6.25. Duas Porcas M5;
- 6.26. Duas Anilhas M5;
- 6.27. Duas Anilhas mola;
- 6.28. Uma Porca M6;
- 6.29. Uma Anilha M6;
- 6.30. Um Excêntrico de segurança;
- 6.31. Uma Cavilha elástica;

*Figura 68: Veios suporte da estrutura**Figura 69: Veios suporte da estrutura*

A seleção feita foi em função da geometria de projeto, características dos componentes, características dos materiais, facilidade de fabrico, processos de fabrico, regulamentos, normas, facilidade de aquisição e relação preço-qualidade.

Com a exceção de rolamentos, freios, parafusos, porcas, anilhas, anilhas de mola, cavilhas elásticas e a mola do sistema de segurança, os demais elementos implicam produção/maquinação.

Para a maioria dos materiais/componentes existem produtos de vários fabricantes, consoante a oferta e disponibilidade no mercado. Há elementos que poderão ser adquiridos ou então fabricados por determinação da melhor opção, técnica ou financeira.