



ISEL



Integração do Sistema de Armazenamento de Energia por Bateria para Guindaste RTG Diesel Híbrido

MAURO MASCARENHAS FERNANDES
(Licenciado em Engenharia Eletrotécnica)

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Eletrotécnica – ramo Energia

Orientador:
Prof. Doutor Ricardo Jorge Ferreira Luís

Júri:
Presidente: Doutor João Hermínio Ninitas Lagarto
Vogais:
Doutor Pedro Miguel Neves da Fonte
Doutor Ricardo Jorge Ferreira Luís

Dezembro 2024

Integração do Sistema de Armazenamento de Energia por Bateria para Guindaste RTG Diesel Híbrido

MAURO MASCARENHAS FERNANDES
(Licenciado em Engenharia Eletrotécnica)

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Eletrotécnica – ramo Energia

Orientador:

Prof. Doutor Ricardo Jorge Ferreira Luís, ISEL - DEEEA

Júri:

Presidente: Doutor João Hermínio Ninitas Lagarto, ISEL - DEEEA

Vogais:

Doutor Pedro Miguel Neves da Fonte, ISEL - DEEEA

Doutor Ricardo Jorge Ferreira Luís, ISEL - DEEEA

Declaração de integridade

Declaro que esta(e) dissertação / trabalho de projeto / relatório de estágio é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

O autor

Mauvo Fernandes

Lisboa, 19 de dezembro de 2024

RESUMO

Num contexto marcado pelo reconhecimento das alterações climáticas e pela procura de soluções sustentáveis, esta dissertação investiga a viabilidade de aumentar a eficiência energética de um guindaste RTG (*Rubber-Tyred Gantry*) convencional, que opera com um motor diesel, através da implementação de um sistema híbrido de armazenamento de energia.

O principal objetivo é analisar a integração de um sistema híbrido paralelo utilizando baterias de íões de lítio, avaliando o seu impacto na eficiência operacional e nas emissões de CO₂. Para validar esta abordagem, foi desenvolvido um estudo de caso baseado em dados de operação de guindastes e consumo de energia, complementado por simulações numéricas que recriam o desempenho nos modos diesel convencional e híbrido.

As simulações foram projetadas para replicar com precisão os parâmetros operacionais do guindaste, permitindo uma análise detalhada do consumo de energia. Na configuração híbrida proposta, o sistema de baterias foi dimensionado para atender às demandas específicas do guindaste, permitindo uma operação mais eficiente dos motores a diesel.

Os resultados demonstram que, através de um investimento relativamente modesto e soluções tecnológicas viáveis, é possível melhorar a eficiência energética do guindaste. Isso não só contribui para a redução das emissões de CO₂, alinhando-se com as metas do Acordo de Paris, como também oferece benefícios ambientais e financeiros significativos, sem comprometer as funções operacionais dos equipamentos.

Palavras-chave: Guindaste RTG diesel-Híbrido; Eficiência Energética; Sistema de Armazenamento de Energia.

ABSTRACT

In a context marked by the recognition of climate change and the search for sustainable solutions, this dissertation investigates the feasibility of improving the energy efficiency of a conventional RTG (Rubber-Tyred Gantry) crane, which operates with a diesel engine, through the implementation of a hybrid energy storage system.

The main objective is to analyze the integration of a parallel hybrid system using lithium-ion batteries, evaluating its impact on operational efficiency and CO₂ emissions. To validate this approach, a case study was developed based on crane operation and energy consumption data, complemented by numerical simulations that recreate the crane's performance in both conventional diesel and hybrid modes.

The simulations were designed to accurately replicate the crane's operational parameters, allowing for a detailed analysis of energy consumption. In the proposed hybrid configuration, the battery system was sized to meet the crane's specific demands, enabling more efficient operation of the diesel engines.

The results show that, through a relatively modest investment and viable technological solutions, it is possible to improve the crane's energy efficiency. This not only contributes to reducing CO₂ emissions, aligning with global sustainability goals, but also offers significant environmental and financial benefits without compromising the operational capabilities of the equipment.

Keywords : Diesel-Hybrid RTG Crane ; Energy Efficiency; Energy Storage System

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é o resultado escrito da contribuição direta ou indireta de várias pessoas, no entanto devo destacar algumas delas individualmente, pela sua contribuição essencial na construção do mesmo.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Ricardo Jorge Ferreira Luís, que esteve sempre disponível para as minhas questões, dúvidas ou problemas. Agradeço a vossa disponibilidade e generosidade em guiar-me nesta odisseia que foi a realização desta dissertação.

Gostaria também de agradecer aos meus professores e colegas do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa que me ajudaram a completar este ciclo da minha vida académica e com quem aprendi muito. Aos meus amigos que sempre apoiaram e compreenderam as minhas ausências, deixo a minha profunda gratidão. E especialmente à minha família, pelo apoio e incentivo constantes que recebi ao longo deste tempo.

Por fim, gostaria de agradecer especialmente ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação (DEEEA) e à Comissão Coordenadora da Licenciatura e Mestrado em Engenharia Eletrotécnica

LISTA DE SÍMBOLOS

C_{bat} – Capacidade nominal de bateria em Ah

CO_2 – Dióxido de carbono

E_{Total} – Energia total consumida ou recuperada em kW

H – Constante de inércia

I_b – Corrente de Carga Fornecida em A

K_d – Coeficiente de atrito em pu

$LiPF_6$ – Hexafluorofosfato de lítio

MP_a – Mega pascal

$P_{média}$ – Potência média em kW

P_{pico} – Potência de pico em kW

T_m – Binário eletromecânico em pu

V_{ref} – Velocidade de referência em rpm

$W(t)$ – Velocidade de rotor em pu

W_o – Velocidade síncrona

$^{\circ}C$ – Graus celsius

Δt – Intervalo de tempo total do ciclo em horas

Δw – Desvio de velocidade em pu

μ_c – Efiência do processo de carga

LISTA DE ABREVIATURAS

AC – Corrente alternada (de *alternated current*)

BES – Sistemas de Armazenamento de energia por bateria (de *battery energy storage*)

BMS – Sistema de gestão da bateria (de *battery management system*)

BSFC – Consumo de combustível específico por freio (de *brake specific fuel consumption*)

CONUAC – Convenção quadro das nações unidas sobre as alterações climáticas

COP21 – Conferência das partes

DC – Corrente contínua (de *corrente contínua*)

DoD – Profundidade de descarga (de *depth of discharge*)

EGR – Recirculação dos gases de escape

FESS – Sistema de armazenamento de energia e volante de inercia (de *flywheel energy storage system*)

GEE – Gases de efeito de estufa

GGD – Grupo de gerado Diesel

MCI – Motor de combustão interna

MD – Motor diesel

RPM – Rotações por minuto

RTG – *Rubber Tired Gantry*

RTGC - *Rubber Tired Gantry Crane*

SAE – Sistema de armazenamento de energia

SCR – Redução catalítica seletiva

SFC – consumo específico de combustível

SI – Sistema internacional

SOA – *Safety operation Area*

SoC – Estado de carregamento (de *state of charge*)

SoH – Estado de condição (de *state of health*)

LISTA DE PROGRAMAS

Matlab/Simulink R2016a

CONVENÇÕES

1 – Bibliografia

Neste trabalho as referências bibliográficas são efetuadas de acordo com a norma portuguesa em vigor, NP 405-1:1994. Dentro desta norma, optou-se pela utilização de citações entre parênteses com o número que lhe está atribuído na bibliografia.

A bibliografia contém as referências realizadas ao longo do texto, listadas segundo a ordem da primeira invocação no texto.

É considerada a utilização de abreviaturas, nos seguintes casos: nomes próprios de autores e editores literários; títulos de publicação em série, de acordo com a NP 139:1964; palavras e termos utilizados nas referências bibliográficas de acordo com a NP 3680:1989.

2 – Sistema de unidades de medida

Neste texto é utilizado, salvo menção expressa em contrário, o Sistema Internacional (SI) de unidades de medida, bem como os símbolos e abreviaturas normalmente para os múltiplos e submúltiplos das diversas unidades. Por ser um sistema de unidades bem conhecido essas abreviaturas não são citadas na secção “Abreviaturas” contida neste documento.

Salienta-se a utilização ao longo do texto da unidade rotações por minuto (rpm), para designar a velocidade angular de funcionamento do motor de combustão interna, que embora não seja uma unidade do SI, neste campo de aplicação o seu uso é generalizado.

3 – Utilização de estrangeirismos

Ao longo desta dissertação utilizam-se alguns estrangeirismos fundamentalmente por dois motivos. O primeiro refere-se a palavras que ainda não se encontrem definidas na língua portuguesa e o segundo refere-se a palavras em que a mera tradução linguística faça perder o significado técnico atribuído às mesmas no original.

Assim, todos os estrangeirismos são realçados ao longo do texto em itálico.

ÍNDICE

Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
1.1 – Motivação do trabalho.....	1
1.2 – Objetivos	3
1.3 – Enquadramento do trabalho.....	3
1.4 – Estrutura da tese	3
Capítulo 2.....	5
Estado da Arte.....	5
2.1 – Descrição Geral dos Guindastes RTG.....	5
2.2 – Guindaste RTG diesel	6
2.3 – Gerador Diesel.....	7
2.3.1 – Motor de Combustão interna.....	7
2.3.2 – Mapa de eficiência de motor de combustão interna.....	9
2.4 – Soluções de hibridização para guindaste de pórtico RTG a diesel.....	10
2.5 – Análise das emissões de CO ₂	12
2.6 – Sistemas de armazenamento de energia	13
2.6.1 – Sistemas de Armazenamento de Energia por Volante de Inércia (FES).....	14
2.6.2 – Sistemas de Armazenamento de Energia por Bateria de íões de lítio.....	15
2.6.3 – Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS)	19
2.7 – Sistema de conversão de energia elétrica	20
2.7.1 – Conversor AC/DC e DC/AC	20
2.7.2 – Conversor DC/DC	21
Capítulo 3.....	23
Descrição e modelação de simulação numérica de pórtico RTG diesel convencional	
.....	23
3.1 – Descrição do pórtico RTG em estudo	23
3.2 – Dimensionamento para a Eficiência Energética do RTG.....	26
3.3 – Descrição do grupo Diesel.....	26
3.4 – Modelo Dinâmico do Gerador diesel	28

3.4.1 – Descrição do Modelo Dinâmico	29
3.5 – Implementação do Modelo Convencional Diesel	33
3.6 – Análise da Simulação.....	34
Capítulo 4	37
Modelação do sistema híbrido	37
4.1 – Grupo Diesel	37
4.2 – Dimensionamento do SAE.....	39
4.2.1 – Controle de Gestão do SAE.....	41
4.3 – Implementação do Modelo Híbrido	42
4.4 – Análise da Simulação.....	44
Capítulo 5	47
Resultados e Discussão	47
5.1 – Resultados	47
5.2 – Discussão	49
5.2.1 – Benefícios verificáveis.....	49
5.2.2 – Benefícios não verificáveis.....	50
5.2.3 – Investimento e Retorno financeiro.....	51
Capítulo 6	53
Conclusões	53
6.1 – Conclusões Gerais.....	53
6.2 – Desenvolvimentos futuros.	54
BIBLIOGRAFIA	55
Anexo A – Código usado no Controle do SAE.....	61

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Aplicação do sistema de armazenando de energia no RTG [17].	13
Tabela 2.2 – Vantagens e desvantagens do FES [20]	15
Tabela 2.3 – Vantagens e desvantagens das baterias de iões de lítio [25].	18
Tabela 3.1 – Característica do RTG [11].	23
Tabela 3.2 – Consumo de combustível do grupo eletrogêneo em função de carga.	28
Tabela 5.1 – Resumo dos Resultado das simulações em diesel e híbrido.	50
Tabela 5.2 – Cálculos financeiro ao logo dos 25 anos	52

ÍNDICE DA FIGURA

Figura 1.1 – Evolução temporal do consumo de combustíveis fósseis na última década [1].	1
Figura 1.2 – Evolução temporal das emissões de CO ₂ de origem fóssil [2].	2
Figura 2.1 – Movimento do guindaste RTG [6].	6
Figura 2.2 – Etapas de funcionamento do Motor diesel (Adaptado de [9])	8
Figura 2.3 – Mapa de eficiência de consumo específico de combustível em função do binário e velocidade desenvolvidos por um MD (Adaptado de [10])	9
Figura 2.4 – Mapa BSFC expectável para um MCI cujo funcionamento é de velocidade constante (figura 2.3 adaptada).	10
Figura 2.5 – Estrutura e componentes de FES.	14
Figura 2.6 – Diagrama esquemática da operação de um BES [21].	16
Figura 2.7 – Princípio de carregamento da bateria de iões de lítio [24]	17
Figura 2.8 – Densidades de massa e volume da tecnologia de armazenamento [23].	18
Figura 2.9 – Diagrama simplificado do sistema de gerenciamento de Bateria [27]	19
Figura 2.10– Sistema elétrico de tração de um HEV [28].	20
Figura 2.11– Esquema clássico de um conversor redutor-elevador [[30]].	21
Figura 3.1 – Demanda de Potência durante um ciclo de carga (Adaptado de [11])	24
Figura 3.2 - GGD AtlasCopco QAS400	26
Figura 3.3 – Motor de diesel Volvo TAD1344 GE.	27
Figura 3.4 – Modelo Dinâmico do gerador diesel.	28
Figura 3.5: Modelo simplificado do regulador de velocidade e da máquina primária diesel[31]	29
Figura 3.6 – Modelo elétrico equivalente da máquina síncrona no sistema de eixos d-q	30
Figura 3.7 – Sistema de Excitação	32
Figura 3.8 – Modelo implementado no <i>simulink</i>	34
Figura 3.9 – Resultado de simulação do RTG diesel convencional.	35
Figura 4.1 – Diagrama Representativo de Guindaste Híbrido [33].	37
Figura 4.2 – Grupo diesel para sistema Híbrido [35].	38
Figura 4.3 – Especificações gerais do SAE [36].	40
Figura 4.4 – Fluxograma geral do algoritmo de controle de gestão de SAE.	42
Figura 4.5 – Modelo de simulação do guindaste RTG diesel-híbrido.	43
Figura 4.6 – Desempenho do Sistema de Baterias.	45

Figura 5.1 – Comparação dos dados de saída entre os modos de funcionamento..... 48

Capítulo 1

Introdução

1.1 – Motivação do trabalho

Desde a revolução industrial, a humanidade tem dependido fortemente de combustíveis fósseis, como petróleo, carvão e gás natural, para produção de energia elétrica e sustentar vários setores, como o setor industrial. A massificação da industrialização proporcionou à população mundial uma melhor qualidade de vida e uma maior esperança de vida, graças aos avanços tecnológicos. No entanto, estes progressos foram acompanhados por um aumento significativo do consumo de energia, como ilustra a figura 1.1.

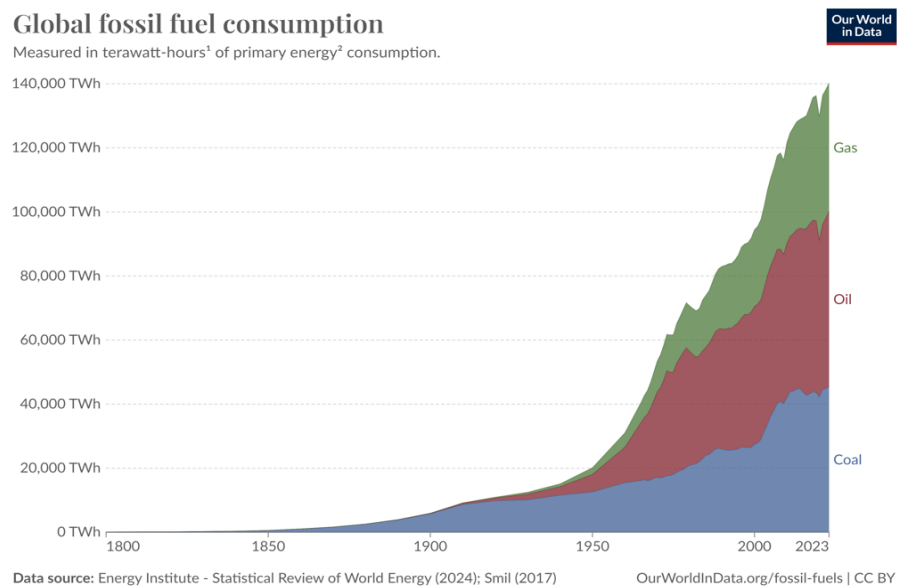


Figura 1.1 – Evolução temporal do consumo de combustíveis fósseis na última década [1].

Este crescimento contínuo da procura de energia resultou num consumo crescente de combustíveis fósseis, que por sua vez, provocou impactos ambientais severos como o aumento das emissões de gases de efeito de estufa (GEE), principalmente o dióxido de carbono (CO₂) e,

por conseguinte, o aumento da temperatura média da superfície terrestre, como demonstra figura 1.2.

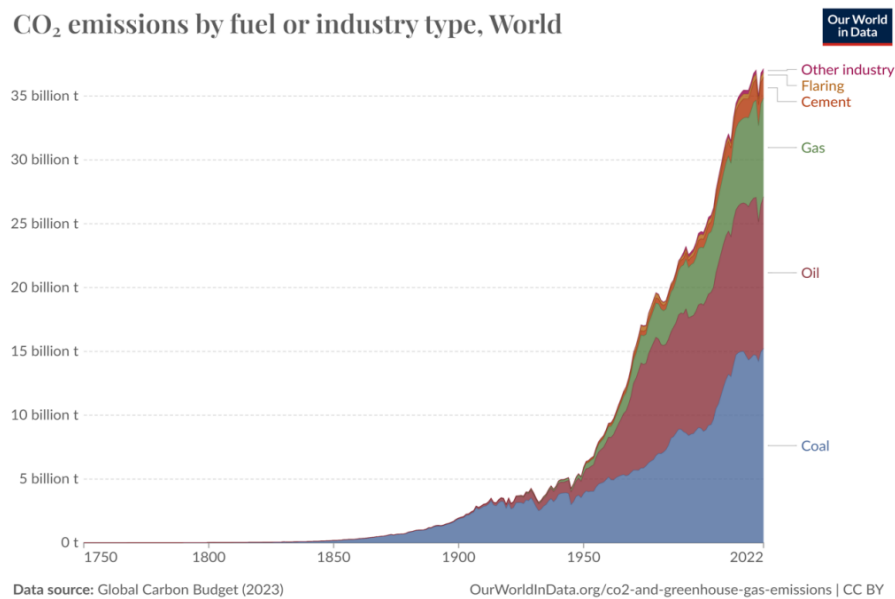


Figura 1.2 – Evolução temporal das emissões de CO₂ de origem fóssil [2].

No contexto dos guindastes *Rubber Tired Gantry* (RTG), que tradicionalmente operam com motores de combustão interna, a inovação tecnológica apresenta novas oportunidades. A implementação de sistemas híbridos, que combinam motores diesel com baterias secundárias, pode proporcionar melhorias significativas, não só reduzindo o consumo de combustível e as emissões de gases de efeito estufa, mas também aumenta a eficiência energética e a capacidade de manobra dos guindastes. Além disso, os guindastes RTG híbridos tornam-se mais versáteis e adaptáveis a diferentes ambientes operacionais, especialmente em locais onde o uso de combustíveis fósseis é limitado.

A adoção de tecnologias de armazenamento de energia com baterias secundárias em guindastes RTG, alinha-se às tendências de mercado que favorecem práticas sustentáveis e a redução do impacto ambiental [3].

O desenvolvimento deste projeto colocará desafios técnicos significativos, exigindo conhecimentos específicos em áreas como eletrônica de potência, controle de motores e gestão de energia em baterias. O estudo do tema pode ajudar a identificar as soluções técnicas mais adequadas e minimizar os riscos associados ao projeto.

1.2 – Objetivos

Os objetivos deste estudo baseiam-se no pressuposto de que a eficiência energética do RTG pode ser melhorada através da inclusão de um sistema de armazenamento de energia (SAE) operando em modo híbrido paralelo ao sistema diesel.

Para o efeito, pretende-se:

- Inicialmente, desenvolver uma simulação numérica no *software Matlab Simulink* para descrever a operação RTG convencional, considerando a demanda de energia em um ciclo de carga e permitindo a análise do consumo de combustível e emissões de CO₂;
- Dimensionamento um SAE que permita uma utilização mais eficiente e menos poluente;
- Desenvolver a simulação da solução proposta nesta dissertação e compará-la com a convencional;
- Estudo da eficiência energética através de modelos de simulação numérica.

1.3 – Enquadramento do trabalho

Este projeto pode ser enquadrado na área da engenharia eletromecânica, mais especificamente nas subáreas de sistemas de potência e propulsão. Envolve também a área de engenharia elétrica, nas subáreas de sistemas de armazenamento e gestão de energia. Esta integração passa pela implementação de um sistema que permite o armazenamento de energia em baterias para posterior utilização, de forma a obter uma maior eficiência energética e uma redução das emissões de gases com efeito de estufa.

1.4 – Estrutura da tese

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos.

No primeiro capítulo, são apresentados os antecedentes do trabalho, a formulação do problema, a finalidade, os objetivos e o enquadramento.

No segundo capítulo foi descrito o estado da arte onde o guindaste de pórtico RTG a diesel foi descrito, incluindo sua fonte de alimentação e gerador a diesel, soluções de hibridização disponíveis publicadas para a melhoria da eficiência dos guindastes RTG, análise das emissões de CO₂, dos diversos sistemas de armazenamento de energia e do sistema de conversão.

No terceiro capítulo, é realizada a caracterização do modelo diesel convencional e implementação no *software Matlab simulink*.

No quarto capítulo, foi realizado o dimensionamento do SAE e também a implementação no modelo *simulink*.

No quinto capítulo, serão apresentados os resultados da simulação e análise numérica.

Por fim, no capítulo seis, são apresentadas as conclusões gerais do trabalho, bem como uma discussão sobre potenciais desenvolvimentos futuros neste tema.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1 – Descrição Geral dos Guindastes RTG

Para acompanhar o crescimento do setor de transporte marítimo, os portos precisam melhorar sua infraestrutura de movimentação e transferência, em termos de desempenho, operação, equipamentos e tecnologia. Um componente crucial desta infraestrutura são os guindastes RTG para organizar corredores de containers, carregar e mover containers de carga, servem também como o elo crítico entre o guindaste e os vários modos de transporte, seja rodoviário, ferroviário ou marítimo [4].

Esta operação pode ser realizada por três movimentos principais [5]:

1. **Elevação e Descida do *Spreader*:** envolve elevar ou baixar o *spreader*, que é a parte do guindaste que se prende ao contentor para elevá-lo, e essa ação pode ser feita com ou sem carga.
2. **Movimento do Trolley:** Este é o movimento lateral do trolley, que pode se mover-se para a esquerda ou para direita ao longo do pórtico, novamente com ou sem carga.
3. **Movimento do Pórtico:** refere-se ao movimento de todo o guindaste RTG ao longo de sua trilha, que é essencial para posicionar o guindaste corretamente para operações de carga e descarga.

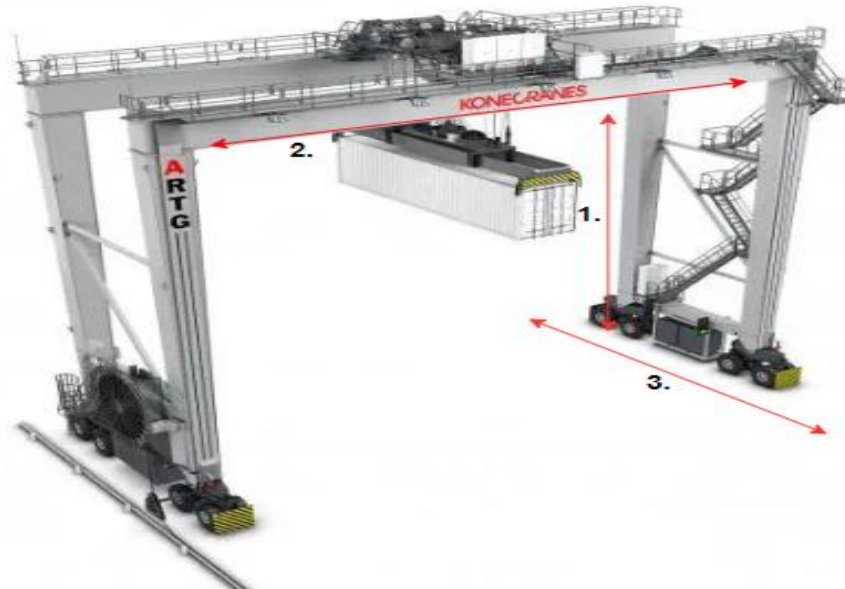


Figura 2.1 – Movimento do guindaste RTG [6].

Estes movimentos mencionados acima são acionados por motores elétricos, que requerem um grande consumo de energia, pois podemos citar que existem três tipos principais de guindastes RTG, ou seja, os autônomos movidos a diesel, conectados à rede elétrica e atualmente os híbridos adaptados com sistemas de armazenamento de energia, que é o objetivo deste trabalho.

2.2 – Guindaste RTG diesel

Os guindastes RTG a diesel constituem o setor dominante, em contraste com os guindastes conectados à rede elétrica. No entanto, eles dependem de geradores de velocidade constante para fornecer a energia elétrica necessária para as várias operações de manuseio realizadas pelos guindastes, bem como para alimentar equipamentos auxiliares, como iluminação e ar condicionado na cabine de controle do operador. No entanto, um dos problemas dos geradores de velocidade constante é que eles operam a uma velocidade fixa, independentemente das variações na carga necessária. Consequentemente, quando o RTG se encontra em estado inatividade ou em fases operacionais de baixa demanda energética, o gerador opera com um baixo fator de carga, o que resulta num elevado consumo específico de combustível, traduzindo-

se nem considerável desperdício de gásóleo e na emissão de grandes quantidades de gases poluentes.

Para melhorar este problema, vários estudos já foram realizados para implementar o sistema híbrido associado a vários tipos de sistemas de armazenamento de energia, como podemos ver a sessão 2.4.

2.3 – Gerador Diesel

2.3.1 – Motor de Combustão interna

O motor de combustão interna (MCI) é um motor térmico que converte a energia liberada pela combustão de um combustível (como gasolina, diesel ou gás natural) em trabalho mecânico. Este processo ocorre em ciclos termodinâmicos, onde a mistura ar-combustível é comprimida, queimada e depois se expande, impulsionando um pistão [7], [8]. Embora seja reconhecida como a principal responsável pela poluição atmosférica e pela diminuição das reservas de petróleo bruto, a sua utilização continua a intensificar-se, principalmente no meio de transporte e também na produção de eletricidade em grande e pequena escala.

O MCI pode ser categorizado, de acordo com o seu ciclo termodinâmico, em motores Otto e Diesel. O ciclo termodinâmico representa a sequência de processos que o fluido de trabalho (uma mistura de ar e combustível) sofre no interior do cilindro: admissão, compressão, combustão e escape, como podemos ver na figura 2.2. A diferença entre os ciclos está na forma como o combustível é queimado. Em Otto, descrito por *Nikolaus A. Otto* em 1876, a mistura de ar e combustível é inflamada por uma faísca. Nos motores diesel, desenvolvidos por *Rudolf Diesel* em 1893, o ar é comprimido até ficar tão quente que o combustível injetado se inflama espontaneamente [8].

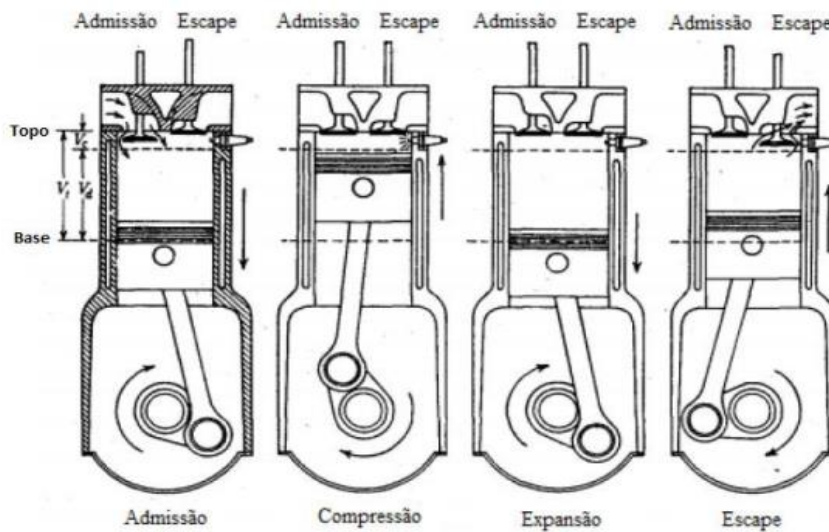


Figura 2.2 – Etapas de funcionamento do Motor diesel (Adaptado de [9])

A figura 2.2 mostra as diferentes fases do ciclo do processo de combustão de combustível num motor diesel (MD). Em que podemos observar que existem duas áreas onde o cilindro atinge seus limites de movimento, sendo o superior e inferior esses extremos. O volume ocupado pelo cilindro, V_c , quando está no topo, é caracterizado pela maior pressão dentro do volume total, V_t . Deste volume total, o volume ocupado pelo cilindro é subtraído, resultando no volume de ar comprimido, V_d , [9].

Durante a fase de admissão, o pistão desloca-se para baixo, criando uma depressão na câmara do cilindro. Essa depressão promove a aspiração de ar atmosférico para o interior do motor, através válvula de admissão. Ao atingir o ponto morto inferior, a válvula de admissão fecha e o pistão, em seu movimento ascendente, inicia a comprimir o ar aprisionado.

A fase de compressão, pouco antes de pistão atingir o topo, é injetado o combustível. Durante a compressão, a temperatura do ar aumenta para várias centenas de graus Celsius, devido á pressão que chega a quase uma dezena de MPa. A combinação de alta pressão, alta temperatura e turbulência do ar resulta em uma explosão dos gases da combustão que impulsiona o pistão para baixo, realizando trabalho mecânico durante a fase de expansão.

No final do processo de combustão, a válvula de escape se abre, permitindo a saída dos gases queimados. O pistão, ao subir, expulsa para o exterior os gases de escape. Antes de o pistão alcançar o topo, a válvula de admissão abre-se, iniciando um novo ciclo.

2.3.2 – Mapa de eficiência de motor de combustão interna

O mapa de eficiência do motor de combustão interna é uma representação gráfica que mostra a eficiência do motor em diferentes pontos de funcionamento, geralmente em função da velocidade do motor (RPM) e da carga do motor (binário ou potência). Esses mapas são usados para otimizar o desempenho do motor e avaliar como o motor se comporta sobre diferentes condições de operação, como o que é desejado para este trabalho.

Para este trabalho, o mapa de eficiência do motor de combustão interna é importante porque nos ajuda a identificar os pontos onde o motor consome menos combustível para uma determinada demanda de potência e também usado para gerenciar o uso do motor de combustão em conjunto com sistemas elétricos, como armazenamento de energia.

Na figura 2.3, é apresentado um exemplo de um mapa de eficiência em função do binário e da velocidade.

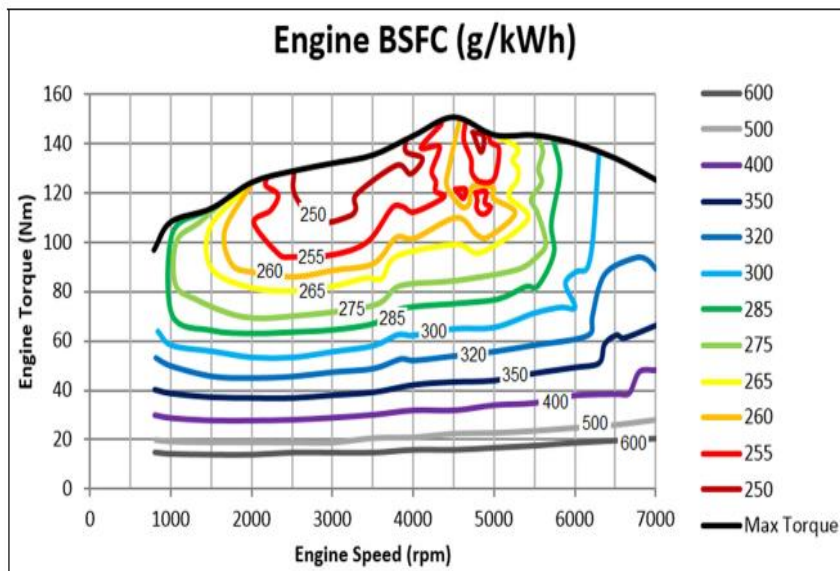


Figura 2.3 – Mapa de eficiência de consumo específico de combustível em função do binário e velocidade desenvolvidos por um MD (Adaptado de [10])

No estudo em questão, uma vez que o grupo gerador opera a uma velocidade constante (detalhado no capítulo 3 da subseção 3.2), o mapa consumo de combustível específico por freio

(BSFC) não é mais representado por linhas de contorno. Tal deve-se ao facto de o motor de combustão interna funcionar com um único valor de velocidade, como ilustrado na figura 2.4.

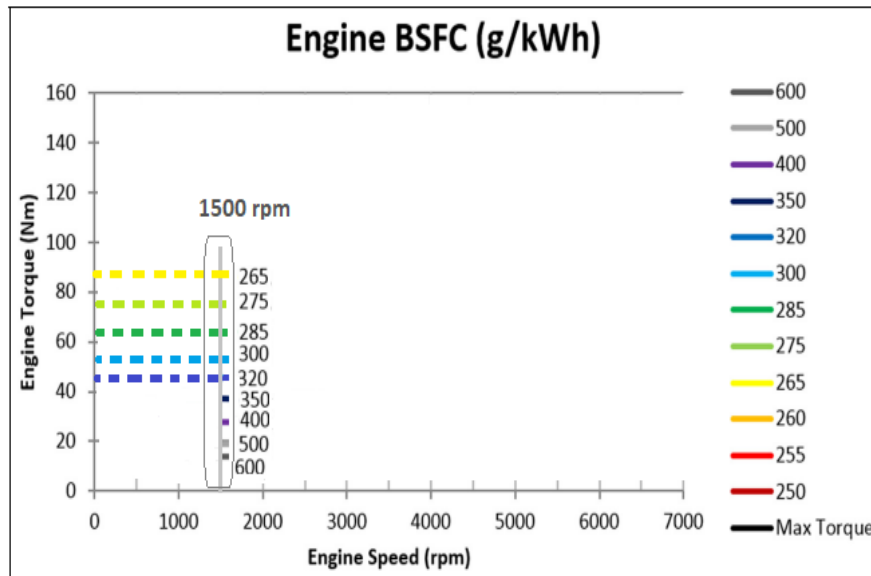


Figura 2.4 – Mapa BSFC expectável para um MCI cujo funcionamento é de velocidade constante (figura 2.3 adaptada).

2.4 – Soluções de hibridização para guindaste de pórtico RTG a diesel

Como mencionado anteriormente, várias soluções já foram trazidas por diferentes autores com o objetivo minimizar os custos totais de energia dos guindastes RTG a diesel e melhorar a emissão do CO₂ utilizada por diferentes tipo de sistemas de armazenamento de energia. Alguns dos principais estudos são destacados nas seguintes secções:

Niu, Wangqiang, [11] introduziu o sistema híbrido, utilizando um gerador a diesel como fonte principal de energia e uma bateria conectada ao barramento DC para suavizar as flutuações de carga, reduzindo a necessidade de conversões contínuas de energia e consequentemente, aumentando a eficiência global do sistema. Os resultados experimentais demonstraram uma redução de 57% no consumo de combustível quando comparado com um sistema de guindaste RTG convencional;

Wei H e Gu W[12], estabelecendo o modelo dinâmico do guindaste RTG híbrido analisando as características de operação em diferentes modos. O custo do carregamento da bateria foi

analisado, e os resultados relatados revelaram que o novo RTG economiza 70%, em comparação com o guindaste RTG convencional;

Kim e Sul[13], propôs um sistema de energia híbrido, composto por um gerador a diesel e supercondensador, para melhorar o desempenho do guindaste RTG. Verificou-se que os supercondensadores contribuem para a recuperação de energia para poupar energia, que normalmente é desperdiçada por uma resistência de travagem, durante a travagem regenerativa na operação de travagem "*Hoist-Down*" e o consumo de energia relacionado com a aceleração rápida na operação "*Hoist-Up*" do RTGC. Para estudar os comportamentos do sistema proposto, foram realizadas simulações em condições de operação desfavoráveis. Vários experimentos foram realizados e o desempenho do sistema proposto foi avaliado com um RTGC real. Os resultados do sistema proposto indicaram que o consumo de combustível pode ser reduzido em 35% e as emissões do motor em mais de 40%;

Niu W e Huang X [14], também apresenta uma fonte de energia híbrida composta por um banco de baterias de íões de lítio e um banco de supercondensadores, conectados ao barramento DC através de conversores DC / DC bidirecionais e um gerador diesel de velocidade variável. O sistema de energia híbrido era controlado por um controlador de máquina de estado. Os resultados da simulação mostram uma redução de 27% no consumo de combustível por ciclo de trabalho, quando comparado com o sistema real, no entanto, o retorno de investimento da solução proposta encontra acima dos 20 anos.

FlynnM, McMullen P e outros [15] discutiram o sistema de armazenamento de volante de inércia, a ser usado em guindastes RTG para reduzir o consumo de combustível e as emissões do sistema. Os volantes são ainda descritos como armazenamento importante, para reduzir a demanda de potência de pico do motor diesel, aumentando a vida útil do motor. Os resultados da pesquisa revelaram que a economia de combustível pode chegar a 35% com o uso do armazenamento do volante. Os autores também descreveram o propósito da FES (*Flywheel Energy Storage system*). O FES pode reduzir a demanda de pico do motor diesel e aumentar a vida útil do motor. Além disso, motores de volante foram identificados para possivelmente capturar energia regenerativa e entregá-la para o próximo elevador de containers. Portanto, isso pode reduzir as emissões de combustível e diesel do motor. Sua pesquisa detalhou a operação e os resultados experimentais de um novo motor de volante de longa duração e seu sistema de acionamento.

2.5 – Análise das emissões de CO₂

Como vimos anteriormente na figura 1.2, que está tendo um aumento na evolução temporal das emissões CO₂, foi criado um tratado internacional que visa combater as mudanças climáticas e limitar o aquecimento global. Adotado em 2015 na Conferência das Partes (COP21) na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas (CQNUAC), o acordo estabelece um objetivo a longo prazo que visa manter o aumento da temperatura média mundial bem abaixo dos 2 °C em relação aos níveis pré-industriais, além de promover esforços para limitar este aumento a 1,5 °C [16].

Para atingir este objetivo, a UE comprometeu-se a reduzir os seus GEE em, pelo menos, 55 % até 2030, em comparação com os níveis de 1990. Esta meta é uma atualização da meta anterior de 40 % e reflete a ambição crescente da UE de combater as alterações climáticas e também de ser o primeiro continente a atingir a neutralidade carbónica até 2050 [16].

Para a análise das emissões de CO₂ em um guindaste diesel RTG envolve o monitoramento das emissões do motor, com a instalação de equipamentos específicos no sistema de exaustão do guindaste para medir esses gases. A quantidade de CO₂ emitida pode variar devido a fatores como o estado e a idade do motor, a qualidade do combustível e a eficiência operacional do guindaste.

Uma vez que as emissões de CO₂ são medidas, as informações podem ser usadas para avaliar o desempenho do guindaste RTG em termos de emissões e identificar áreas para melhorias. Tal poderá incluir a aplicação de tecnologias de redução de emissões, tais como sistemas de redução catalítica seletiva (SCR) ou sistemas de recirculação dos gases de escape (EGR), ou a adoção de práticas de manutenção e gestão de combustível mais eficientes.

Esta análise é essencial para que as empresas cumpram as metas de redução de emissões estabelecidas pelo Acordo de Paris e pela União Europeia até 2030, promovendo operações mais sustentáveis e competitivas. Ao mesmo tempo, contribui para a proteção do ambiente, alinhando-se com os objetivos globais de combate às alterações climáticas.

2.6 – Sistemas de armazenamento de energia

O presente estudo examina a viabilidade de melhorar a eficiência energética de um guindaste RTG movido a diesel por meio de soluções de hibridização, como foco na adição de um sistema de armazenamento de energia que funciona em paralelo ao motor diesel. A implementação de um SAE visa não apenas reduzir o consumo de combustível e as emissões associadas, mas também otimizar o desempenho operacional do guindaste.

A escolha do tipo de SAE a ser utilizado dependerá das exigências operacionais específicas do guindaste, como, por exemplo:

- A energia disponível para guindaste operar em modo elétrico;
- Tempo de resposta para fornecimento de energia;
- A potência necessária durante as operações de movimento de cargas;
- As limitações de espaço e peso para instalação do SAE;
- Custo por unidade de capacidade armazenamento de energia.

Nas próximas secções, serão analisadas as tipologias de SAE que podem ser aplicáveis a um RTG diesel, de acordo com a tabela 2.1:

Tabela 2.1 – Aplicação do sistema de armazenando de energia no RTG [17].

Aplicação SAE	RTG	
	Conectado à rede	Baseado em Diesel
UCES	✓✓	-
BES	-	✓
FES	-	✓✓
UCES+BES	✓	-
UCES+FES	-	-
BES+FES	-	✓

2.6.1 – Sistemas de Armazenamento de Energia por Volante de Inércia (FES)

Sistema de Armazenamento de energia por volante de inércia é uma tecnologia que armazena energia cinética através da rotação de um volante de inércia. Este sistema consiste em um rotor que gira em altas velocidades dentro de um ambiente de baixo atrito, como um vácuo, para reduzir as perdas de energia. Durante o carregamento, um motor é acionado para acelerar a volante de inércia. Quanto mais rápido o volante gira, maior a quantidade de energia cinética pode ser armazenada. Na fase de descarga, o volante começa a desacelerar e a energia cinética armazenada é convertida novamente em energia elétrica por meio de um motor-gerador elétrico [18], [19]. O volante e o gerador estão ligados coaxialmente, o que significa que o controle do gerador também regula a velocidade do volante de inércia, como ilustrado na figura 2.5. Além disso, o conceito de volante existe há milhares de anos e é um dos primeiros sistemas mecânicos de armazenamento de energia.

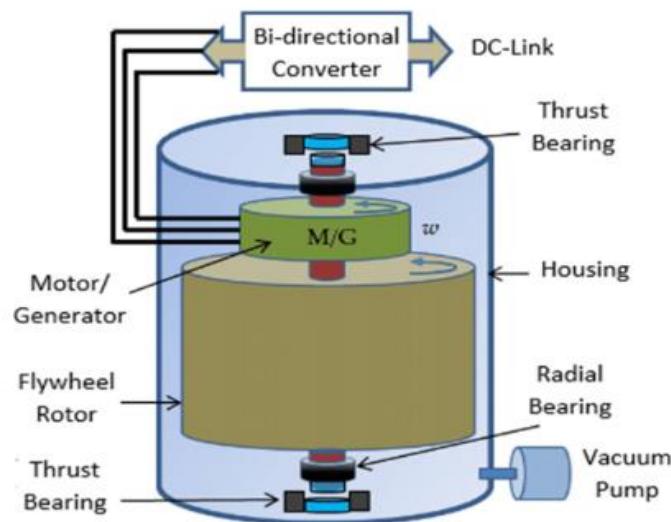


Figura 2.5 – Estrutura e componentes de FES.

O FES, como qualquer tipo de sistema de armazenamento de energia, é uma tecnologia promissora que vem ganhando atenção por sua capacidade de fornecer soluções eficientes há muito tempo e é considerada adequada para aplicações que incluem estabilização de redes elétricas para uso em sistema de backup de energia e transporte, como qualquer tecnologia, tem vantagens e desvantagens que podem ser vistas na tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Vantagens e desvantagens do FES [20]

<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
<i>Ciclo de vida mais longo</i>	<i>Durabilidade complexa</i>
<i>Mais profundidade de descarga</i>	<i>Rolamento de baixa perda</i>
<i>Densidade específica potencialmente alta</i>	<i>Estresse mecânico</i>
<i>Tempo de descarga curta</i>	<i>Custo elevado</i>

2.6.2 – Sistemas de Armazenamento de Energia por Bateria de íons de lítio

O BES pode ser definido como um sistema de armazenamento que utiliza baterias químicas recarregáveis. Esta tecnologia tem vindo a ser aplicada em vários setores, como empresas, indústrias e comércios.

Um sistema BES é composto por várias células eletroquímicas conectadas em serie ou paralela, que geram eletricidade com a voltagem desejada através de reação eletroquímicas. Cada célula possui dois elétrodos, um ânodo e um cátodo, imersos em um eletrólito que pode ser em estado sólido, líquido ou viscoso. Essas células têm a capacidade de converter energia de forma bidirecional entre energia elétrica e química. Durante a descarga, as reações eletroquímicas acontecem simultaneamente nos ânodos e cátodos. No circuito externo, os eletrões são libertados pelos ânodos e coletados pelos cátodos. Durante o carregamento, as reações são invertidas e a bateria é recarregada ao aplicar uma voltagem externa aos elétrodos, conforme a figura 2.6.

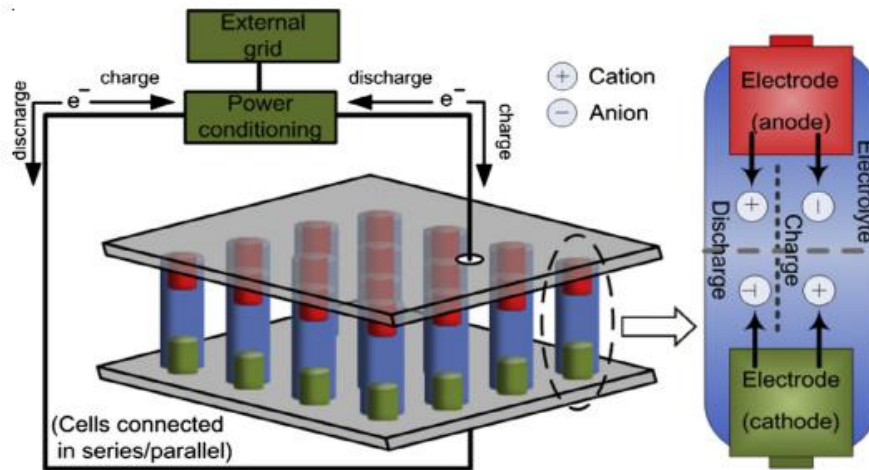


Figura 2.6 – Diagrama esquemática da operação de um BES [21].

Embora existam várias tecnologias de baterias recarregáveis disponíveis para diferentes aplicações, neste trabalho será abordada a utilização de baterias de íões de lítio.

Um sistema de bateria de íões de lítio é uma tecnologia avançada de armazenamento de energia, fundamentada num processo eletroquímico de carga e descarga. Esses processos ocorrem entre dois elétrodos principais: o cátodo, que é o elétrodo positivo e geralmente composto por um óxido metálico contendo lítio. E o ânodo, que é o elétrodo negativo, tipicamente formado por material de carbono ou composto que permitem a intercalação de íões [22].

Entre os elétrodos, há um separador, que é um material polimérico poroso. Esse separador é crucial para a operação da bateria, pois impede o contacto direto entre o cátodo e o ânodo, evitando curto-circuitos, enquanto permite a passagem de íões de lítio. Os elétrodos e o separador estão imersos em um eletrólito, que é uma solução de sais de lítios (como LiPF_6) dissolvidos em solventes orgânicos. O eletrólito facilita a movimentação dos íões de lítio entre os elétrodos durante os ciclos de carga e descarga [22].

Durante o processo de carregamento, os átomos de lítio presentes no cátodo perdem elétrons e se tornam íões de lítio, que migram através do eletrólito em direção ao ânodo. No ânodo, esses íões combinam com elétrons fornecidos por uma fonte externa de energia e se intercalam entre as camadas de carbono, sendo armazenados na forma de átomos de lítio. No processo de descarga, essa reação é revertida: os átomos de lítio deixam o ânodo, liberando elétrons que

fluem através de um circuito externo, enquanto os íons de lítio retornam ao cátodo, completando o ciclo e fornecendo energia elétrica utilizável, como podemos ver na figura 2.7 [21], [23].

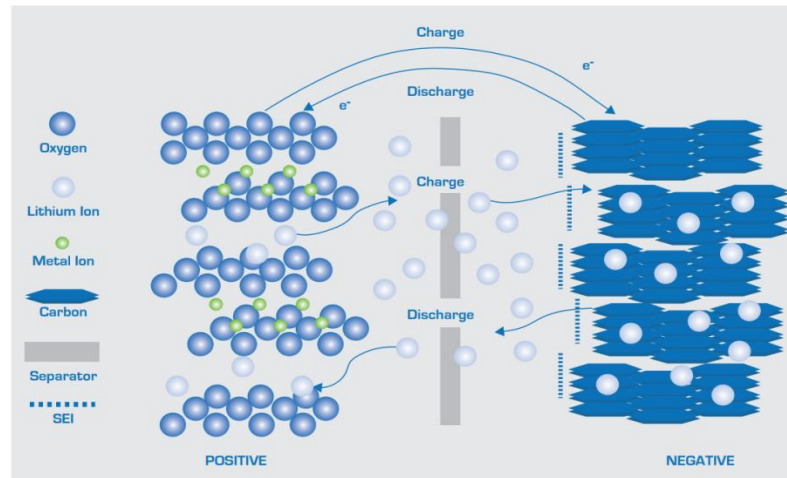


Figura 2.7 – Princípio de carregamento da bateria de íons de lítio [24]

Esses sistemas de bateria de íons de lítio são amplamente utilizados em diversas aplicações, desde dispositivos eletrônicos portáteis até veículos elétricos, devido às suas notáveis características. Essas baterias têm desempenhado um papel crucial no uso de energia em equipamentos portáteis e da mobilidade elétrica, oferecendo uma combinação única de eficiência energética e desempenho. No entanto, como qualquer tecnologia, as baterias de íon de lítio possuem tanto vantagens quanto desvantagens que devem ser consideradas para avaliar a sua adequação em diferentes contextos. A seguir, serão abordados os principais pontos positivos e negativos conforme a tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Vantagens e desvantagens das baterias de íões de lítio [25].

<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
<i>Células seladas (sem manutenção necessária)</i>	<i>Custos iniciais moderados</i>
<i>Longo ciclo de vida e baixa taxa de auto descarga</i>	<i>Degradação a altas temperaturas</i>
<i>Largo espectro de temperatura de operação</i>	<i>Necessidade de circuitos de proteção</i>
<i>Alta capacidade de carga e descarga de energia</i>	<i>Perda de capacidade quando sobrecarregado</i>
<i>Alta eficiência energética e densidade energética</i>	<i>Possíveis fugas térmicas quando sobrecarregado</i>
<i>Pouco efeito de memória e longa vida estrutural</i>	<i>Possíveis fugas térmicas quando esmagadas</i>

Em comparação com outros tipos de tecnologia de armazenamento de energia, as baterias de íões de lítio destacam-se pela sua elevada densidade energética, tanto em volume como em peso, como ilustrado na figura 2.8 [26]. Isso a torna a escolha ideal para aplicações que exigem eficiência, leveza e compactação, superando tecnologias mais antigas e menos eficientes, como as baterias de chumbo-ácido e níquel-cádmio.

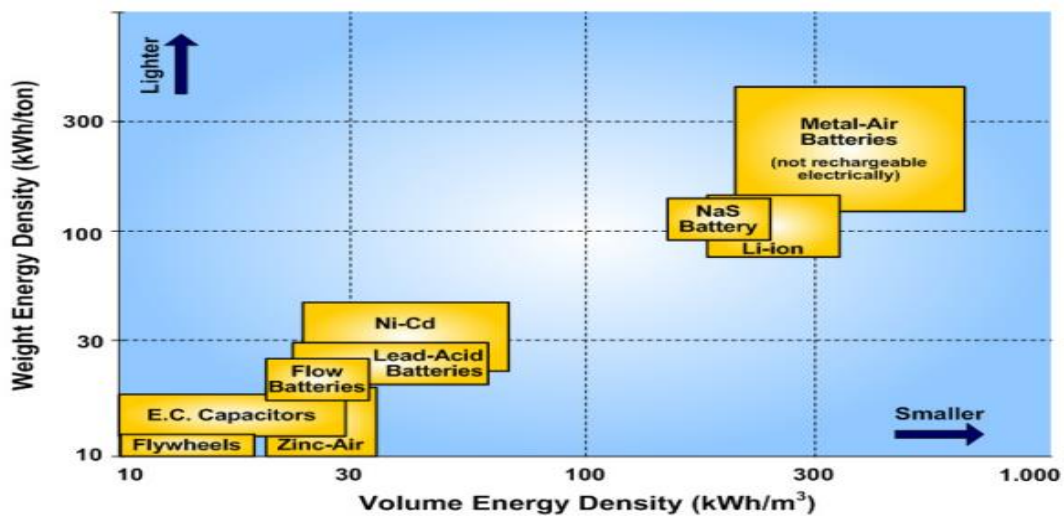


Figura 2.8 – Densidades de massa e volume da tecnologia de armazenamento [23].

As baterias de íões de lítio, frequentemente utilizadas para armazenamento de energia, requerem mecanismos de proteção adicionais para garantir o seu desempenho ideal e segurança operacional. Para isso, a utilização de um **Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS)** é essencial. Este sistema não só protege as baterias de perigos como sobrecarga e descarga profunda, o que pode reduzir a sua eficiência e vida útil, mas também garante que todas as

células da bateria são carregadas e descarregadas uniformemente. Desta forma, o BMS é fundamental para manter o equilíbrio e a fiabilidade do sistema de armazenamento de energia. Esta questão será analisada mais pormenorizadamente na subsecção 2.6.3.

2.6.3 – Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS)

Um sistema de gestão de baterias (BMS) é um sistema eletrónico responsável por controlar e proteger as células de uma bateria recarregável, o seu papel fundamental é monitorizar em tempo real os parâmetros essenciais como tensão, corrente e temperatura de cada célula individualmente e também para além de coordenar o equilíbrio entre as células para maximizar o desempenho e prolongar a sua vida útil como podemos ver na figura 2.9, e garantir que o sistema funcione dentro do limite de segurança (SOA), evitando falhas como sobrecarga, descarga profunda, entre outros problemas que comprometam a integridade do sistema. Também é responsável por realizar cálculos para determinar o estado de funcionamento das baterias, tais como, o estado de carga (SoC) indicando quanta energia útil ainda está disponível, o estado de saúde (SoH) que reflete o estado geral da bateria em relação à sua capacidade e a profundidade de descarga (DoD) que indica até onde a bateria tem de ser descarregada em relação à sua capacidade total. Toda esta monitorização é essencial para a utilização das baterias, prevendo a autonomia restante e antecipando a sua manutenção e substituições se necessário.

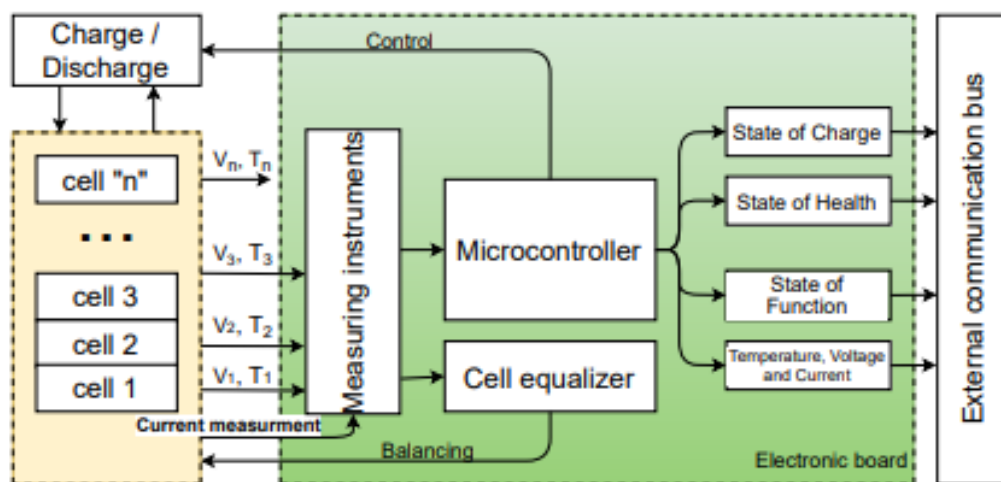


Figura 2.9 – Diagrama simplificado do sistema de gerenciamento de Bateria [27]

2.7 – Sistema de conversão de energia elétrica

A eficiência energética de um sistema híbrido ou elétrico que depende crucialmente da conversão entre a bateria e os motores de propulsão elétricos. Esta conversão é realizada através de um sistema integrado de conversores eletrônicos de potência, tais como AC/DC e DC/DC.

AC/DC permitem que o SAE receba corrente da rede elétrica ou outro sistema AC e converta-a em DC e, ao mesmo tempo, permita que o SAE forneça uma tensão à rede ou motores elétricos, através de inversores DC/AC, enquanto a conversão DC/DC é essencial para ajustar a tensão da bateria de forma a atender às demandas e também minimizar perdas durante a conversão e garantir a estabilidade da tensão da bateria em diferentes condições de carregamento.

2.7.1 – Conversor AC/DC e DC/AC

Um conversor AC/DC, ou um retificador, é um dispositivo eletrônico usado para transformar corrente alternada (AC) de uma rede elétrica ou outros sistemas em corrente contínua (DC). Estas transformações são geralmente usadas IGBT'S, MOSFETs ou GTOs. Para o nosso estudo de causa, as baterias serão carregadas pelo motor de propulsão e também fornecer energia, por isso é importante usar um conversor de corrente bidirecional AC / DC trifásico porque com isso em um momento está convertendo de AC / DC este quando a fonte de alimentação para carregar a bateria e outro momento é quando DC / AC a direção inversa, isto significa que a bateria está a descarregar fornecendo energia à rede ou à carga.

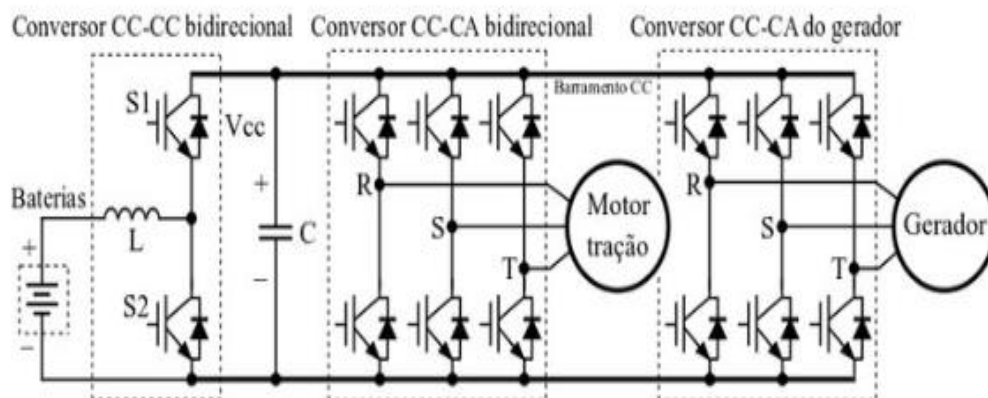


Figura 2.10– Sistema elétrico de tração de um HEV [28].

2.7.2 – Conversor DC/DC

Os conversores DC/DC são dispositivos eletrônicos que transformam uma tensão de corrente contínua em outra tensão de DC, podendo ser maior ou menor que a tensão de entrada.

Existem dois tipos de conversores, os isolados, que são *flyback* (conversor redutor-elevador), *forward* (redutor isolador) e o *fall-bridge* (conversor de ponte completa), e os não isolado são *buck* que é um conversor redutor que reduz a tensão de entrada, *boost* conversor de elevador que permite aumentar a tensão de entrada , *buck-boost* conversor redutor-elevador significa que permite aumentar como diminuir a tensão de entrada, *Cuk* e semelhante ao converso *buck-boost*, mas com característica de isolamento e o *SEPIC* é um conversor não isolado com a capacidade de aumentar ou diminuir a tensão [29].

Para um sistema de tração como o que vimos na figura 2.10, foi utilizado um conversor bidirecional DC/DC chamado redutor-elevador (*Buck-Boost*), descrito na figura 2.11

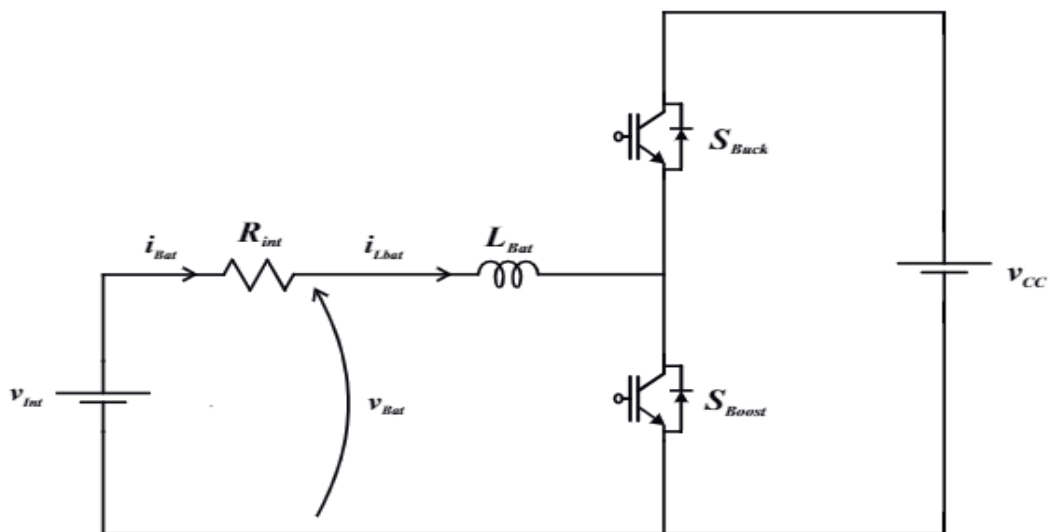


Figura 2.11– Esquema clássico de um conversor redutor-elevador [30].

Para o desenvolvimento do modelo de conversor, considera-se que ele opera em dois estados de comutação distintos. No primeiro estado, o interruptor *SBoost* está em condução (ligado), permitindo que a corrente flua através dele, enquanto o interruptor *SBuck* permanece em um

estado bloqueado (desligado), impedindo a condução da corrente. No segundo estado, o interruptor SBoost desliga-se, interrompendo o fluxo de corrente, e o interruptor SBuck entra na condução (ligado), permitindo a passagem de corrente através dele. Ao longo do ciclo de funcionamento, estes dois interruptores funcionam de forma complementar, ou seja, enquanto um está aberto (desligado), o outro está fechado (ligado), alternando continuamente entre estes dois estados.

Capítulo 3

Descrição e modelação de simulação numérica de pórtico RTG diesel convencional

3.1 – Descrição do pórtico RTG em estudo

O guindaste RTG convencional é um equipamento essencial nos terminais portuários, responsável pela movimentação eficiente de contentores. A operação de um guindaste RTG envolve uma série de movimentos complexos, como elevação, transporte horizontal e empilhamento de contentores, cada um exigindo diferentes níveis de potência. Neste estudo, para a simulação, foram consideradas as características e, principalmente, a demanda de potência durante um ciclo de operação, conforme ilustrado na tabela 3.1 e na figura 3.1.

Tabela 3.1 – Característica do RTG [11].

Parâmetro	Valor	Unidade
Carga nominal	40	Toneladas
Massa do espalhador	11	Toneladas
Massa do trole	25	Toneladas
Velocidade de elevação (carga máxima)	26	m/min
Velocidade de elevação (sem carga)	52	m/min
Velocidade do pórtico	90	m/min
Velocidade do trole	70	m/min
Altura de elevação	18,1	metros
Potência do motor de elevação	170	kW
Potência do motor do pórtico	2 x 50	kW
Potência do motor do trole	2 x 15	kW

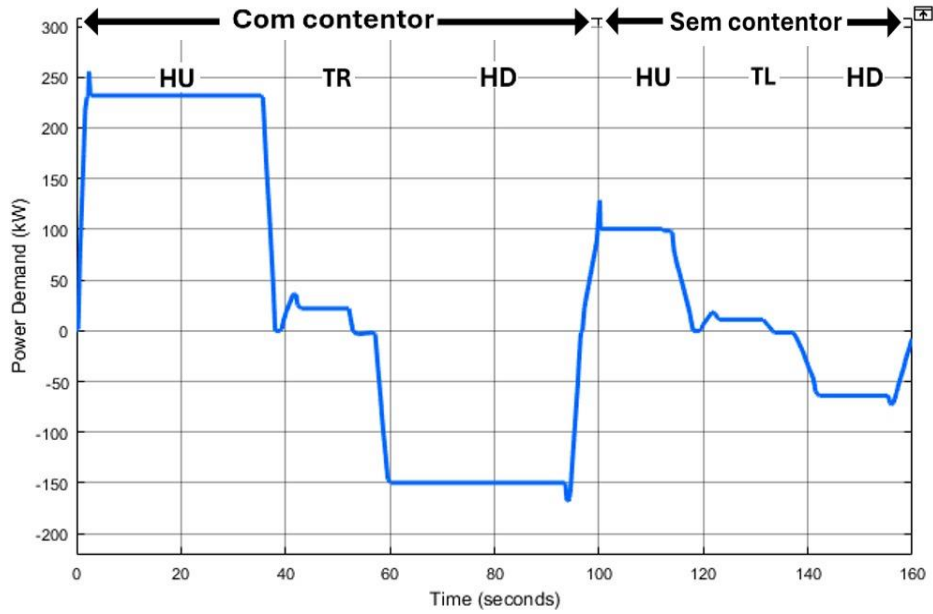


Figura 3.1 – Demanda de Potência durante um ciclo de carga (Adaptado de [11])

A Figura 3.1 ilustra a variação da demanda de energia de um RTG ao longo de um ciclo operacional típico, evidenciando oscilações significativas em valores positivos e negativos. Os picos positivos correspondem aos momentos em que o RTG consome energia, como durante o levantamento de contentores, movimento horizontal e aceleração, enquanto os picos negativos indicam a recuperação de energia através da frenagem regenerativa. A figura apresenta também o perfil de potência de um guindaste RTG operando com um contentor de 40 toneladas. O ciclo completo dura aproximadamente 160 segundos, sendo dividido em duas fases: na primeira fase de 96 segundos, o guindaste transporta o contentor, enquanto na segunda fase de 64 segundos, opera sem carga. O pico de potência durante a elevação do contentor é de aproximadamente 252 kW enquanto a potência regenerada durante a descida atinge 158 kW. A figura destaca a alternância entre fases de alta e baixa demanda de potência, indicando rápidas transições de carga e elevadas tensões e correntes no sistema. A demanda média de energia para o ciclo apresentado é aproximadamente 88,86 kW, conforme a equação (3.2), resultando em uma relação pico- média de aproximadamente de 2,8 (3.3), o que evidencia a alta variabilidade do sistema e seu potencial para hibridização.

$$P_{\text{médio}} = \frac{E_{\text{Total}}}{\Delta t} \quad (3.1)$$

Onde:

- $P_{\text{médio}}$ é a potência média (em kW);
- E_{Total} é a energia total consumida ou recuperada (em kW);
- Δt é o intervalo de tempo total do ciclo (em horas).

Como a potência varia ao longo do tempo, a potência média foi determinada pela integral da potência em função do tempo $P(t)$, dividido pelo tempo total.

$$P_{\text{médio}} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt \quad (3.2)$$

$$P_{\text{médio}} = \frac{1}{0,044} \left(\int_0^{\frac{96}{3600}} 252 dt + \int_{\frac{96}{3600}}^{\frac{160}{3600}} 158 dt \right) \approx 88,86 \text{ kW}$$

No caso:

- O ciclo total tem 160 segundo (ou 0,044 horas, considerando (160/3600));
- A análise inclui picos de potência positiva (elevação do contentor, 252 kW) e potência regenerativa negativa (descida, 158 kW).
- Essas potências instantâneas são integradas ao longo do tempo nos semiciclos.

A relação entre a potência de pico (P_{pico}) e a potência média ($P_{\text{média}}$) é:

$$R = \frac{P_{\text{pico}}}{P_{\text{média}}} \quad (3.3)$$

Substituindo os valores:

- $P_{\text{pico}} = 252 \text{ kW}$ (potência máxima durante a elevação);
- $P_{\text{média}} = 88,86 \text{ kW}$

$$R = \frac{252}{88,86} \approx 2,8$$

Essa relação indica que a potência de pico é 2,8 vezes maior do que a potência média.

3.2 – Dimensionamento para a Eficiência Energética do RTG

A otimização do consumo de energia em equipamentos portuários, como o guindaste RTG, é um desafio contínuo, especialmente no contexto de operações mais sustentáveis. A demanda de potência de um guindaste RTG é altamente dinâmico, com flutuações significativas ao longo do ciclo de trabalho, como ilustrado na figura 3.1. Essas variações incluem picos elevados durante atividades intensas como elevação e movimentação de contentores, e vales durante fases menos exigentes.

O dimensionamento adequado do gerador para atender a essa demanda variável é fundamental para garantir a eficiência energética. Com a ajuda da ferramenta de dimensionamento do gerador da *AtlasCopco*, foi possível projetar um gerador capaz de atender às necessidades do guindaste de forma eficiente e segura.

Para o dimensionamento, foi considerado a demanda de máxima de 252 kW e média 89 kW de potência, margem de segurança que varia entre 10-20% e fator de potência, desta forma foi utilizado um grupo gerador diesel de QAS400 da *AtlasCopco*, conforme ilustra a figura 3.2.



Figura 3.2 - GGD AtlasCopco QAS400

3.3 – Descrição do grupo Diesel

Para realizar a simulação deste trabalho, foi utilizado um grupo gerador a diesel AtlasCopco QAS400 de 410 kVA. Este consiste num motor diesel acoplado diretamente a um gerador síncrono, sem a interposição de uma caixa de velocidades. A igualdade de rotação entre os elementos permite a otimização do sistema. Os controladores de tensão e frequência

monitorizam continuamente o funcionamento do grupo, atuando na proteção das cargas e do próprio equipamento. Estes controladores ajustam os parâmetros de funcionamento do gerador, garantindo a qualidade da potência fornecida e a integridade do sistema.

O grupo gerador diesel (GGD) é composto por um motor diesel Volvo TAD1344 GE de 6 cilindros em linha, com uma cilindrada de 12.780 cm³ e um sistema de injeção eletrônica *common rail* (direto). O motor, turboalimentado e equipado com um *intercooler*, atende aos padrões atuais de emissões e segurança. O motor aciona um gerador síncrono trifásico, Leroy Somer, modelo LSA47.2 S4, de excitação sem escovas, capaz de fornecer uma potência nominal de 410 kVA nas frequências de 50 e 60 Hz, com fator de potência de 0.8, atendendo às exigências de diversos mercados. A figura 3.3 ilustra o motor diesel utilizado neste sistema.

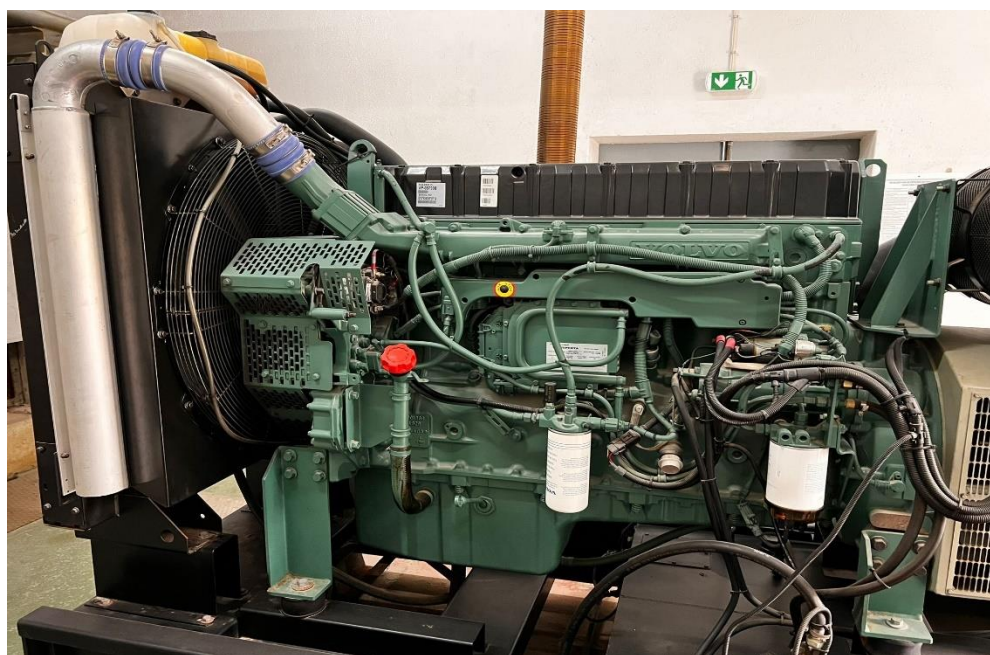


Figura 3.3 – Motor de diesel Volvo TAD1344 GE

A fim de otimizar o consumo de combustível e avaliar a eficiência operacional dos grupos geradores, os dados de consumo nominal (l/h) e consumo específico de combustível (SFC) foram analisados para diferentes percentagens de carga fornecidas pelo fabricante de acordo com a tabela 3.2. Analisando verifica-se que estes motores diesel têm o seu ponto de

eficiência ótimo a funcionar a 75% da sua capacidade máxima, este é um valor comum que tende a ir de acordo com outros modelos de motores da mesma marca.

Tabela 3.2 – Consumo de combustível do grupo eletrogêneo em função de carga.

(%) Carga	0	10	25	50	75	100	110
Consumo (L/h)	9.80	18.00	27.00	42.80	60.30	81.10	83.00
SFC (g/kWh)	NA	472	283	224	211	213	198

3.4 – Modelo Dinâmico do Gerador diesel

No interior do bloco do gerador diesel, ilustrado no subsistema 1 da figura 3.5, está representado o modelo dinâmico conforme ilustrado na Figura 3.4. Este modelo simula o comportamento de um gerador síncrono acionado por um motor diesel, incluindo os sistemas de regulação e medição associados. A modelagem abrange os seguintes componentes principais:

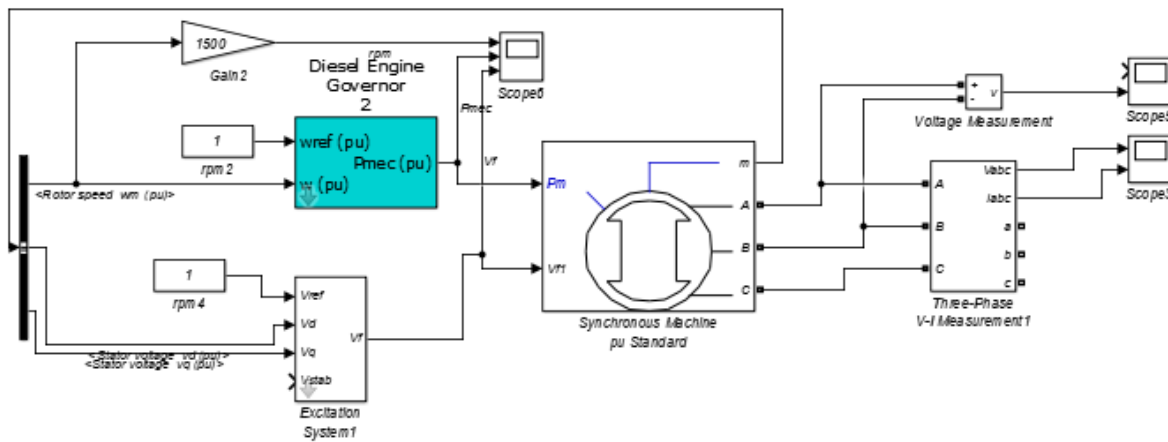


Figura 3.4 – Modelo Dinâmico do gerador diesel

3.4.1 – Descrição do Modelo Dinâmico

- **Regulador de Velocidade do Motor Diesel:**

O bloco "*Diesel Engine Governor*" esta a representa o modelo simplificado do regulador de velocidade e da máquina primária diesel conforme ilustra a figura 3.5.

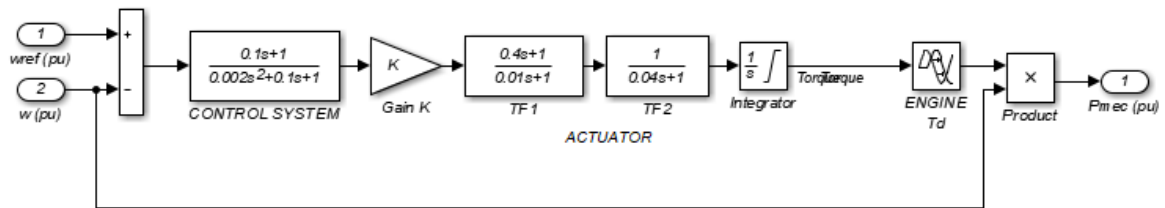


Figura 3.5: Modelo simplificado do regulador de velocidade e da máquina primária diesel[31]

Este bloco representa o sistema do motor diesel e seu controle de velocidade, com duas entradas: a velocidade de referência e a velocidade real da máquina. A saída do bloco é a potência mecânica. A inércia do motor é integrada ao gerador.

A função transferência do controlador e do atuador são apresentados a seguir:

$$H_c = \frac{K(1+T_3.s)}{(1+T_1.s+T_1.T_2.s^2)} \quad (3.4)$$

$$H_a = \frac{K(1+T_4.s)}{s.(1+T_5.s).(1+T_6.s)} \quad (3.5)$$

O regulador de velocidade, um dispositivo mecânico ou eletromecânico, controla a rotação do motor diesel ajustando a quantidade de combustível injetado. Ele funciona como um controlador proporcional-integral, utilizando o desvio entre a frequência de referência (w_{ref}) e a frequência real (w) como sinal de erro. O objetivo principal é equilibrar a potência mecânica

fornecida pelo motor e a potência elétrica gerada, garantindo que a frequência da rede elétrica seja mantida no valor nominal. A ação integral do controlador elimina o erro estacionário, assegurando um controle preciso e estável.

- **Máquina Síncrona**

O modelo de máquina síncrona utilizado foi extraído da biblioteca *SimPowerSystems* do MATLAB/Simulink. Este modelo é versátil, podendo operar tanto como motor quanto como gerador, dependendo do sentido do fluxo de potência mecânica. No presente trabalho, a máquina síncrona foi configurada para operar exclusivamente como gerador, com o fluxo de potência mecânica sempre direcionado para a máquina.

O modelo considera a dinâmica dos enrolamentos do estator, do campo e de amortecimento. O circuito equivalente é representado no referencial rotativo q-d. Todos os parâmetros do rotor e as grandezas elétricas são referenciados ao estator, sendo identificados por índices do estator. Os índices utilizados são definidos da seguinte forma:

- d, q : grandezas nos eixos d e q;
- R, s : grandezas de rotor e estator;
- l, m : indutâncias de fuga e magnetização;
- f, k : grandezas dos enrolamentos de campo e amortecedores

O modelo elétrico da máquina [31] é apresentado na figura 3.6:

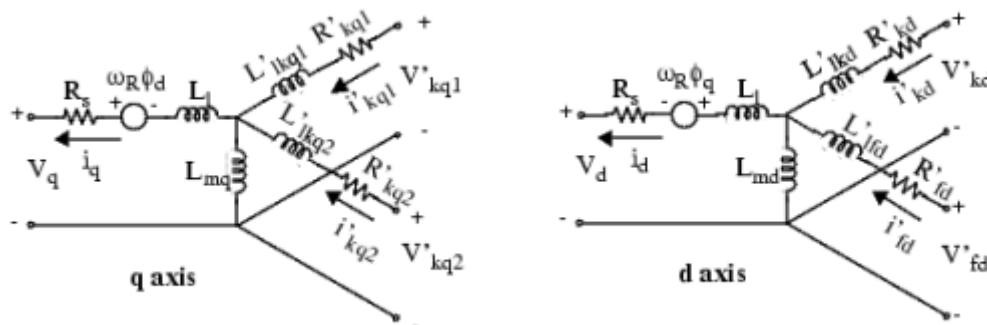


Figura 3.6 – Modelo elétrico equivalente da máquina síncrona no sistema de eixos d-q

As equações do sistema:

$$V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \varphi_d - \omega_R \varphi_q \quad (3.6)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \varphi_q + \omega_R \varphi_d \quad (3.7)$$

$$V'_{fd} = R'_{fd} i'_{fd} + \frac{d}{dt} \varphi'_{fd} \quad (3.8)$$

$$V'_{kd} = R'_{kd} i'_{kd} + \frac{d}{dt} \varphi'_{kd} \quad (3.9)$$

$$V'_{kq1} = R'_{kq1} i'_{kq1} + \frac{d}{dt} \varphi'_{kq1} \quad (3.10)$$

$$V'_{kq2} = R'_{kq2} i'_{kq2} + \frac{d}{dt} \varphi'_{kq2} \quad (3.11)$$

$$\varphi_d = L_d i_d + L_{md} (i'_{fd} + i'_{kd}) \varphi'_{fd} \quad (3.12)$$

$$\varphi_q = L_q i_q + L_{md} i'_{kq} \quad (3.13)$$

$$\varphi'_{fd} = L'_{fd} i'_{fd} + L_{md} (i_d + i'_{kd}) \quad (3.14)$$

$$\varphi'_{fd} = L'_{fd} i'_{fd} + L_{md} (i_d + i'_{kd}) \quad (3.15)$$

$$\varphi'_{kd} = L'_{kd} i'_{kd} + L_{md} (i_d + i'_{fd}) \quad (3.16)$$

$$\varphi'_{kq1} = L'_{kq1} i'_{kq1} + L_{md} e u_q \quad (3.17)$$

$$\varphi'_{kq2} = L'_{kq2} i'_{kq2} + L_{md} e u_q \quad (3.18)$$

Como todas as máquinas elétricas rotativas, além do comportamento elétrico, o modelo deve incluir uma parte que descreva o comportamento mecânico. O comportamento mecânico da máquina síncrona é descrito por[31]:

$$\Delta\omega(t) = \frac{1}{2H} \int_0^t (T_m - T_e) dt - k_d \times \Delta\omega(t) \quad (3.19)$$

$$\omega(t) = \Delta\omega(t) + \omega_0 \quad (3.20)$$

Em que:

Δw : Desvio de velocidade (p.u)

H: Constante de inércia (s)

T_m : Binário eletromecânico (p.u)

K_d : Coeficiente de atrito (p.u)

$W(t)$: Velocidade de rotor (p.u)

W_0 : Velocidade síncrona (tipicamente 1 p.u)

As equações apresentadas foram implementadas no bloco disponível na biblioteca *SimPowerSystems*, que foi utilizado na construção deste modelo.

• **Sistema de Excitação**

O sistema de excitação da máquina síncrona é responsável por fornecer a corrente contínua necessária para a criação do campo magnético no rotor, garantindo o funcionamento adequado em regime síncrono. Esse sistema controla a tensão de excitação aplicada ao enrolamento do rotor, influenciando diretamente a tensão terminal da máquina e seu desempenho dinâmico.

O modelo utilizado (Figura 3.7), que se encontra disponível na biblioteca do *Simulink* e descreve sistemas de corrente contínua, está detalhado na norma IEEE Standard 421.5-2005 [32].

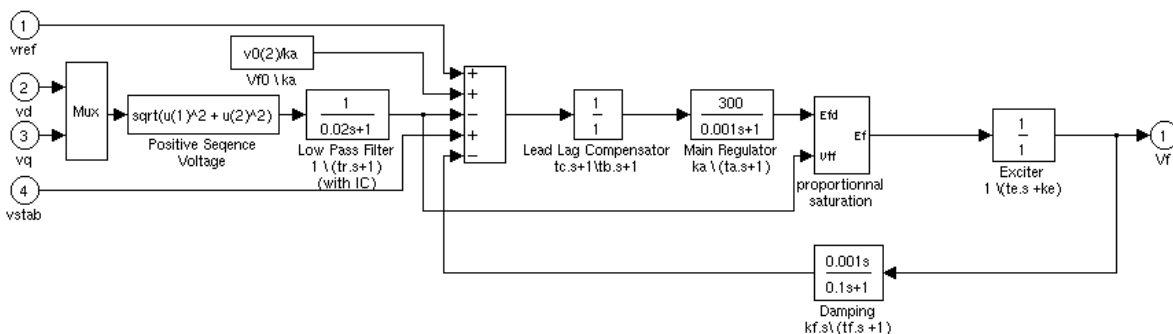


Figura 3.7 – Sistema de Excitação

As tensões V_{ref} e V_{stab} , fornecidas pelo estabilizador de sistema de potência, definem a tensão de referência para o sistema. O compensador *lead-lag*, caracterizado pelas constantes de tempo T_b e T_c , atua como um filtro, reduzindo o ganho do sistema em altas frequências. Essa ação

minimiza a influência negativa do regulador sobre o amortecimento das oscilações do sistema. A malha de realimentação, composta pelo ganho k_f e constante de tempo T_f , é fundamental para garantir a estabilidade do sistema de regulação de tensão. O amplificador, com ganho K_a e constante de tempo T_a , além de amplificar o sinal de erro, possui limites de saturação para proteger o sistema. De acordo com o modelo disponível na biblioteca SimPowerSystems, a excitatriz pode ser representada pela seguinte equação:

$$\frac{V_{fd}}{e_f} = \frac{1}{K_e + sT_e} \quad (3.21)$$

A equação representa a função de transferência entre a entrada e_f e a saída V_{fd} do regulador. A tensão de saída do gerador, após retificação e filtragem, é comparada com a referência no regulador. O erro resultante é amplificado e aplicado ao sistema de excitação, que atua como o elemento de potência do sistema de controle. O regulador pode receber sinais auxiliares para melhorar o desempenho em regime transitório, amortecendo as oscilações do rotor causadas por desequilíbrios entre as potências mecânica e elétrica.

3.5 – Implementação do Modelo Convencional Diesel

Para modelar e analisar o desempenho energético e ambiental de um guindaste RTG diesel convencional, foi desenvolvido o modelo de simulação no *Matlab/Simulink*. O modelo, dividido em quatro subsistemas interligados, representa os principais processos do sistema. A Figura 3.5 ilustra o diagrama de blocos do modelo, evidenciando as relações entre os subsistemas, as principais entradas e saídas.

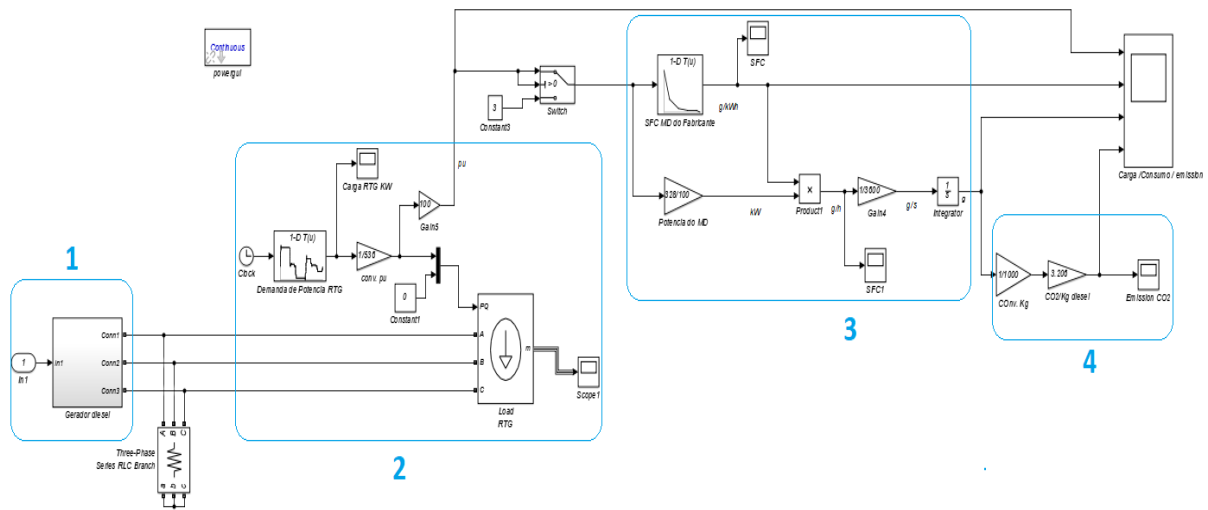


Figura 3.8 – Modelo implementado no *simulink*

A Figura 3.8 apresenta o modelo de simulação de um guindaste RTG diesel convencional, constituído por quatro subsistemas interligados, numerados de 1 a 4. O primeiro subsistema representa o gerador a diesel, a principal fonte de energia para o sistema. O gerador converte a energia química do diesel em energia elétrica trifásica, que alimenta o guindaste. O segundo subsistema simula a procura de energia elétrica do guindaste RTG ao longo de um ciclo de funcionamento (figura 3.1), à saída o valor expresso por unidade (pu- por unidade). O terceiro subsistema calcula o consumo de combustível específico (SFC) do gerador em função da carga, utilizando uma curva característica fornecida pelo fabricante. O SFC, em g/kWh, é multiplicado pela potência instantânea do motor diesel em kW para obter um consumo de combustível instantâneo em g/h, que é então integrado para determinar o consumo total. O quarto subsistema estima as emissões de dióxido de carbono (CO₂) com base no consumo total de gasóleo, utilizando um fator de emissão de 3,2 kg CO₂/kg de gasóleo. O resultado é uma estimativa das emissões totais de CO₂ do sistema durante o ciclo simulado.

3.6 – Análise da Simulação

A simulação em *simulink* permite analisar o desempenho do guindaste RTG diesel, monitorando variáveis como consumo específico de combustível e emissões de CO₂ como ilustrado na figura 3.9.

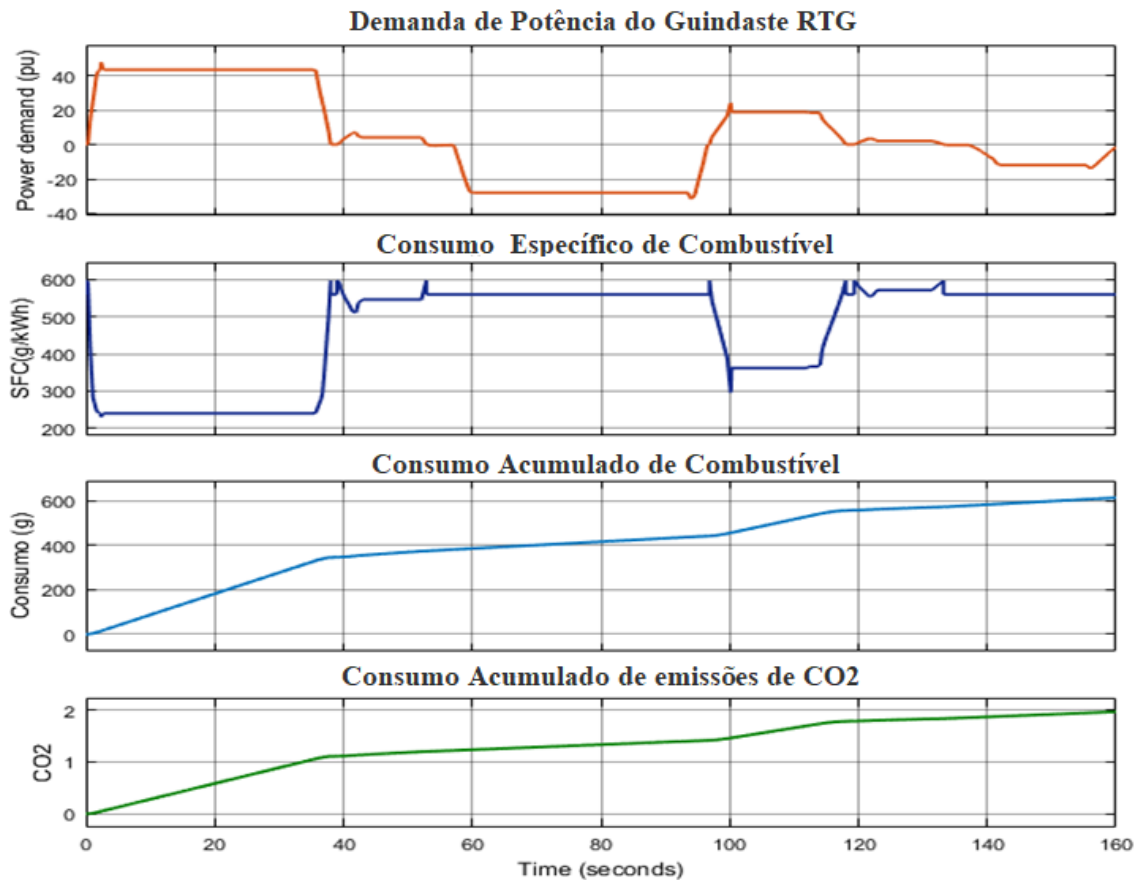


Figura 3.9 – Resultado de simulação do RTG diesel convencional

A Figura 3.9 apresenta quatro gráficos distintos, que mostram diferentes aspectos do funcionamento do guindaste. O primeiro gráfico, em laranja, mostra a variação na demanda de energia do guindaste em unidades por unidade (pu) ao longo do tempo. Observa-se uma flutuação significativa na demanda, com momentos de potência negativa, indicando que o guindaste pode estar em situação de recuperação ou frenagem regenerativa. Essas variações refletem diferentes fases de operação de guindastes, como elevação e movimento de translação de contentores, movimentação do RTG e períodos de pausa do trabalho. O segundo gráfico SFC (g/kWh) ilustra como o consumo específico de combustível varia com a demanda de energia. Valores de SFC muito altos indicam menor eficiência, enquanto valores mais baixos indicam operação mais eficiente, também podemos observar picos de consumo de combustível quando

a demanda de energia é alta, como no arranque. Estas variações sugerem que o motor diesel ajusta o seu consumo com base na carga. O terceiro gráfico representa o consumo de combustível acumulado ao longo do tempo, em gramas. A curva é ascendente, indicando o consumo acumulado de combustível à medida que o guindaste opera. O aumento do consumo alinha-se com as variações na demanda de energia, aumentando mais rapidamente quando há maior procura e estabilizando-se durante períodos de menor procura. O gráfico final mostra as emissões de CO₂, diretamente relacionadas com o consumo de combustível. Como o gráfico anterior, a curva de emissões também cresce continuamente, à medida que mais combustível queimado resulta em maiores emissões de CO₂ para a atmosfera. A taxa de crescimento das emissões é semelhante à do consumo de combustível, reforçando a correlação entre o consumo de gasóleo e a quantidade de CO₂ gerada.

A simulação revela que o guindaste RTG diesel convencional tem variações significativas na demanda de energia, o que impacta diretamente no consumo específico de combustível, consumo total e emissões de CO₂. Para melhorar a eficiência do sistema, ele foi melhorado com a adoção de tecnologias como o armazenamento de energia, como podemos ver no capítulo 4.

Capítulo 4

Modelação do sistema híbrido

Neste capítulo, será descrito o procedimento utilizado para aumentar a eficiência energética do guindaste RTG diesel, através da implementação de um sistema de armazenamento de energia (SAE) operando em paralelo com o grupo diesel. A Figura 4.1 apresenta um diagrama ilustrativo do modelo, que será implementado no software MATLAB/*Simulink*. Este modelo permite simular a integração do SAE com o sistema de tração do guindaste, destacando como a energia armazenada nas baterias pode ser utilizada para reduzir a dependência do motor diesel, otimizando o consumo de combustível e as emissões de CO₂.

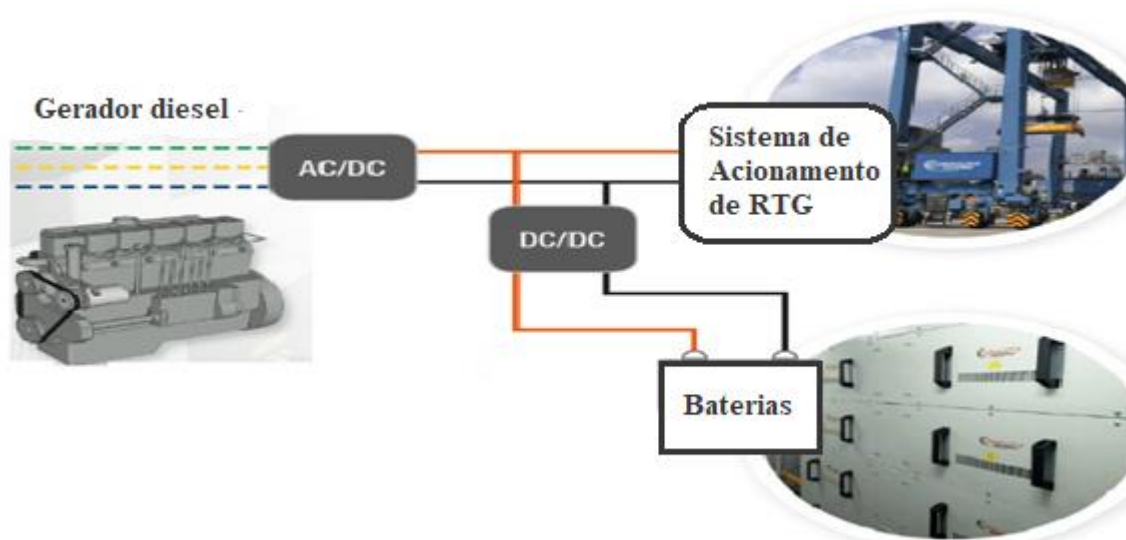


Figura 4.1 – Diagrama Representativo de Guindaste Híbrido [33].

4.1 – Grupo Diesel

Neste modelo, o grupo gerador a diesel foi dimensionada para funcionar de forma mais eficiente com a integração do sistema de armazenamento de energia. No modelo "convencional" anterior, era utilizado um gerador com potência de 410 kVA, dimensionado para atender toda a demanda de energia do guindaste RTG, incluindo cargas de pico.

Com a implantação do SAE, que armazena e libera energia em períodos de demanda variável, foi possível reduzir a necessidade de um grande gerador. Assim, no modelo híbrido, o gerador a diesel foi substituído por uma unidade com capacidade de até 150 kVA, suficiente para atender à demanda média do sistema. A redução na capacidade do gerador reflete a menor dependência do motor diesel, uma vez que o SAE consegue suprir cargas de pico e recuperar energia durante a operação, resultando em maior eficiência energética e menores emissões poluentes.

O grupo gerador diesel (GGD) é composto por um motor diesel Volvo TAD731 GE de 6 cilindros em linha, com uma cilindrada de 7.150 cm³ e um sistema de injeção eletrônica *common rail* (direto). O motor, turboalimentado e equipado com um *intercooler*, atende aos padrões atuais de emissões e segurança [34]. O motor aciona um gerador síncrono trifásico, Leroy Somer, modelo TAL 044 J, de excitação sem escovas, é capaz de fornecer uma potência nominal de 150 kVA à frequência de 50 Hz, com fator de potência de 0.8, atendendo às exigências de diversos mercados. A figura 4.2 ilustra o motor diesel utilizado neste sistema.

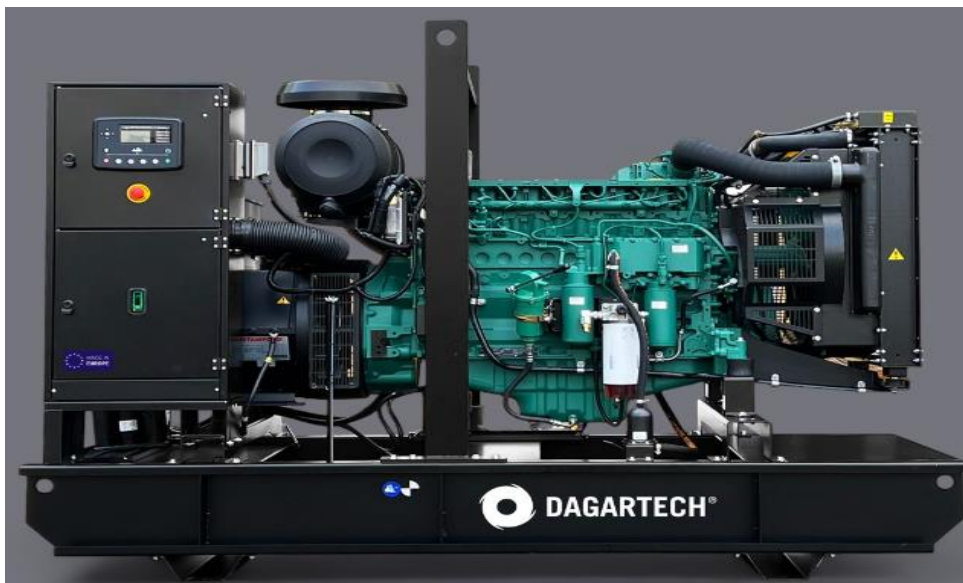


Figura 4.2 – Grupo diesel para sistema Híbrido [35].

Para otimizar o consumo de combustível e avaliar a eficiência operacional dos grupos geradores, foram analisados dados de consumo nominal (l/h) e consumo específico de combustível (SFC) para diferentes níveis de carga, conforme fornecido pelo fabricante. A análise revela que estes motores diesel atingem o seu ponto de máxima eficiência quando

funcionam a 75% da sua capacidade total, um comportamento típico observado noutros modelos de motores da mesma marca.

4.2 – Dimensionamento do SAE

Para realizar um dimensionamento adequadamente o sistema de armazenamento de energia (SAE), é essencial definir com clareza os seus objetivos e requisitos. Esse requisito tem de ser alinhados com as necessidades energéticas do guindaste, levando em conta a função principal do sistema de armazenamento de energia.

De forma geral, o principal objetivo para este SAE é otimizar a eficiência energética do guindaste RTG, possibilitando a operação em modo híbrido com o gerador diesel. Desta forma, o guindaste pode funcionar em modo totalmente elétrico durante períodos de baixa demanda, aproveitando a energia armazenada no SAE e reduzindo custos operacionais.

O sistema de armazenamento de energia (SAE) foi dimensionado apenas durante as fases de demanda negativa ou frenagem regenerativa, identificadas entre aproximadamente entre 60-100 segundos e 140-160 segundos como ilustra a figura 3.1. A energia regenerada durante essas fases, atinge picos de até 150 kW que será convertida em energia elétrica e armazenada no SAE para ser utilizado durante os momentos de alta demanda.

A energia regenerada foi calculada de seguinte forma:

$$Energia = Potência \times Tempo \quad (4.1)$$

$$Energia = 150 \times 40 \text{ segundos} = 6000 \text{ kW} \approx 1,67 \text{ kWh}$$

Durante esse período será armazenada em bateria aproximadamente 1,67 kWh de energia. Considerando uma jornada de trabalho de 6 horas diárias, o guindaste tem a capacidade de recuperar até:

$$\text{Número de ciclos por hora} = \frac{3600 \text{ segundos}}{160 \text{ segundos}} = 22,5 \text{ ciclos/hora}$$


$$\text{Total de ciclos em 6 horas} = 22,5 \times 6 = 135 \text{ ciclos}$$

$$Energia = 1,67 \text{ kWh} \times 135 \text{ ciclos} = 225,45 \text{ kWh}$$

Logo é possível recuperar até 225,45 kWh de energia em uma jornada de trabalho de 6 horas.

Tendo em conta a energia que pode ser recuperada, efetuou-se uma pesquisa no mercado para encontrar um banco de baterias de iões de lítio que pode suporta no mínimo 225,45 kWh de capacidade. A solução encontrada é do fabricante CATL que inclui um conversor bidirecional.

As especificações dessa solução, ilustra na figura 4.3, servirão como base de referência para realização do modelo no *simulink*.



MODEL: Galaxy 233Liquid-AIO-2H	
BESS	
Cell type	LFP, CATL LFP280
System battery configuration	1P52S*5
Battery capacity (BOL) at DC side	233 kWh
System output voltage range	650V~949V
Dimensions of battery unit (W *H * D)	1250mm*2230mm*1330mm
Weight of battery unit*	≈2950kg
Degree of protection	IP67
Corrosion protection level	C 3
Relative humidity	0 ~ 85 % (non-condensing)
Operating temperature range	-20°C ~ 60°C (> 45°C derating)
Max. working altitude	3000 m
Cooling concept of battery Chamber	Smart liquid cooling
Fire safety equipment	Combustible gas detection and ventilation systems, aerosol fire suppression

Figura 4.3 – Especificações gerais do SAE [36].

Para este trabalho, optou-se por uma bateria de iões de lítio devido às suas vantagens: alta densidade energética, maior eficiência em ciclos de carga e descarga e maior vida útil quando comparada a outras tecnologias. O dimensionamento da bateria considerou a potência máxima exigida pelo sistema, o tempo de operação desejado e as perdas associadas aos processos de carga e descarga. O modelo dinâmico da bateria, implementado no ambiente MATLAB/Simulink, baseia-se em equações matemáticas que descrevem o comportamento elétrico e a evolução do estado de carga (SOC) ao longo do tempo. Este modelo considera:

$$V_t = V_{oc}(SOC) - i_b \cdot R_{int} \quad (4.2)$$

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{1}{C_{bat}} \int i_b dt \quad (4.3)$$

Adicionalmente aos períodos de ralenti e paragem do gerador, o sistema híbrido do guindaste RTG permite a carga da bateria de íões de lítio através de uma fonte externa, como uma tomada elétrica ou um painel solar. Esta funcionalidade aumenta a flexibilidade operacional do equipamento, permitindo a sua utilização em locais remotos ou com infraestruturas elétricas limitadas. O processo de carregamento da bateria pode ser modelado por um circuito equivalente, considerando a tensão da bateria, a corrente de carga e a resistência interna. A equação que descreve este processo é a seguinte:

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{\eta_c}{C_{bat}} \int i_b dt \quad (4.4)$$

Onde:

- SOC(t): Estado de carga da bateria no tempo t.
- I_b : Corrente de carga fornecida pela fonte externa (A).
- C_{bat} : Capacidade nominal da bateria (Ah).
- η_c : Eficiência do processo de carga (pu).

4.2.1 – Controle de Gestão do SAE

A operação eficiente do sistema híbrido, como o guindaste RTG para distribuir com integração de armazenamento de energia, depende da gestão inteligente dos recursos energéticos disponíveis. O fluxograma a seguir representa o algoritmo de controle desenvolvido para otimizar a operação do sistema de armazenamento de energia em conjunto com o grupo diesel. Este algoritmo tem como objetivo decidir, em tempo real, como será suprida a demanda de energia, utilizando estrategicamente tanto as baterias quanto o grupo gerador a diesel.

A lógica de controlo tem em conta o estado de carga (SoC) das baterias e a quantidade de minimização do consumo de combustível.

No fluxograma, são estabelecidos diferentes cenários de operação, que variam de acordo com a demanda de energia e o estado das baterias. Através desta abordagem, é possível garantir que o sistema atua de forma a reduzir o consumo específico de combustível e, ao mesmo tempo, prolongar a vida útil das baterias e do grupo diesel.

Em seguida, ele apresentou o fluxograma do algoritmo que detalha o processo de tomada de decisão para gerenciar o SAE em um guindaste híbrido.

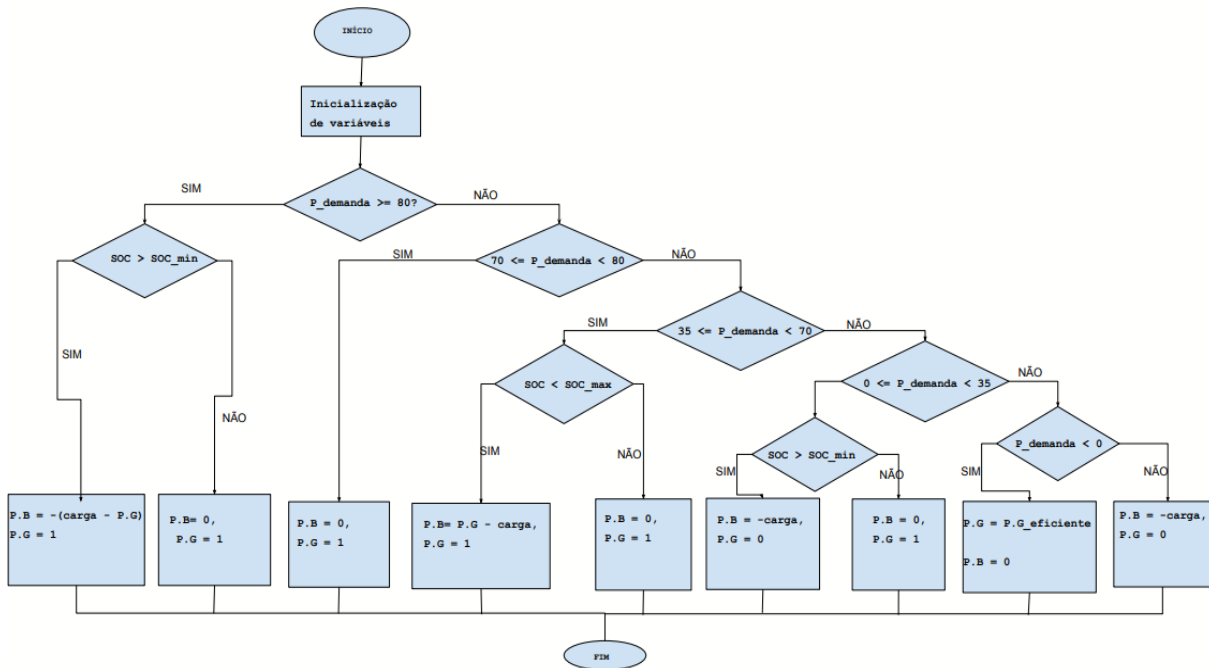


Figura 4.4 – Fluxograma geral do algoritmo de controle de gestão de SAE.

4.3 – Implementação do Modelo Híbrido

A figura seguinte apresenta o modelo de simulação desenvolvido no *matlab/Simulink*, que visa analisar o desempenho energético e operacional de um guindaste RTG diesel híbrido equipado com um sistema de armazenamento de energia (SAE) baseado em baterias de íões de lítio. O objetivo é avaliar a eficiência energética e a redução das emissões de CO₂ deste sistema híbrido quando comparado com um sistema convencional a diesel.

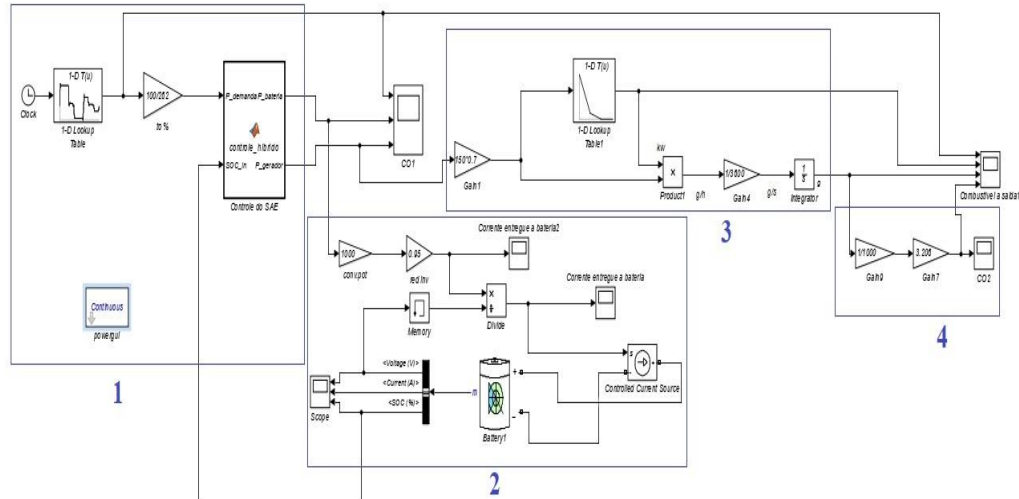


Figura 4.5 – Modelo de simulação do guindaste RTG diesel-híbrido.

O modelo apresentado na Figura 4.5 representa a simulação de um guindaste RTG diesel-híbrido em software *simulink*. Esta simulação é composta por quatro blocos principais, cada um responsável por uma função essencial no comportamento dinâmico do sistema.

No primeiro bloco, modela a demanda de energia do guindaste ao longo do tempo. É responsável por simular o perfil de potência exigido pelo guindaste em diferentes momentos de operação. A demanda de energia ao longo do ciclo operacional é fornecida por uma tabela, que define o valor da potência necessária em função do tempo.

O sinal de saída da tabela, convertido em porcentagem, é enviado para controle híbrido, que é o código do sistema, que decide como a potência será distribuída entre o motor diesel e o banco de baterias, dependendo do perfil de carga e da disponibilidade de energia no sistema de armazenamento. Esse controle é essencial para garantir que o SAE seja utilizado de forma eficiente, fornecendo energia em momentos de alta demanda e recuperando energia durante fases de demanda negativa. O segundo bloco representa o sistema de armazenamento de energia da bateria, onde *Battery1* simula a bateria de íon de lítio usada no guindaste híbrido. A corrente fornecida à bateria é determinada pelo SAE, de acordo com o estado de carga (SoC) e a corrente de entrada/saída. A corrente de entrada é integrada ao longo do tempo para estimar o estado de carga da bateria, e a tensão e a corrente são monitoradas em tempo real através de blocos "Scope". Estas paredes são essenciais para garantir que a bateria não está sobrecarregada ou

descarregada além dos limites aceitáveis, protegendo a sua integridade. O terceiro e quarto subsistema trabalham juntos para calcular o consumo de combustível e as emissões de CO₂ do guindaste RTG. O terceiro subsistema calcula o consumo específico de combustível (SFC) do gerador, com base na carga aplicada, multiplicando o SFC pela potência instantânea para obter o consumo de combustível em g/h, que é então integrado ao longo do tempo para obter o total consumido. O quarto subsistema utiliza o consumo total de combustível e, aplicando um fator de emissão de 3,2 kg CO₂ por quilograma de gasóleo, estima as emissões totais de CO₂ geradas durante o ciclo de operação.

4.4 – Análise da Simulação

A simulação em *simulink* possibilita análise do desempenho do sistema de baterias de íões de lítio e o desempenho do guindaste RTG em modo híbrido que será apresentado no capítulo 5. A figura 4.6 ilustra três parâmetros fundamentais: a tensão (V), a corrente (A) e o estado de carga (SOC) das baterias ao longo do tempo.

Na primeira parte do gráfico, a curva de tensão das baterias mostra as variações ao longo do ciclo, refletindo a resposta do sistema de armazenamento de energia às demandas de energia do guindaste. O segundo gráfico mostra a corrente das baterias, onde é possível ver períodos de carga e descarga, essenciais para o funcionamento do modo híbrido. Finalmente, o terceiro gráfico representa o estado de carga (SOC) das baterias, que indica o nível de energia disponível nas baterias durante o funcionamento.

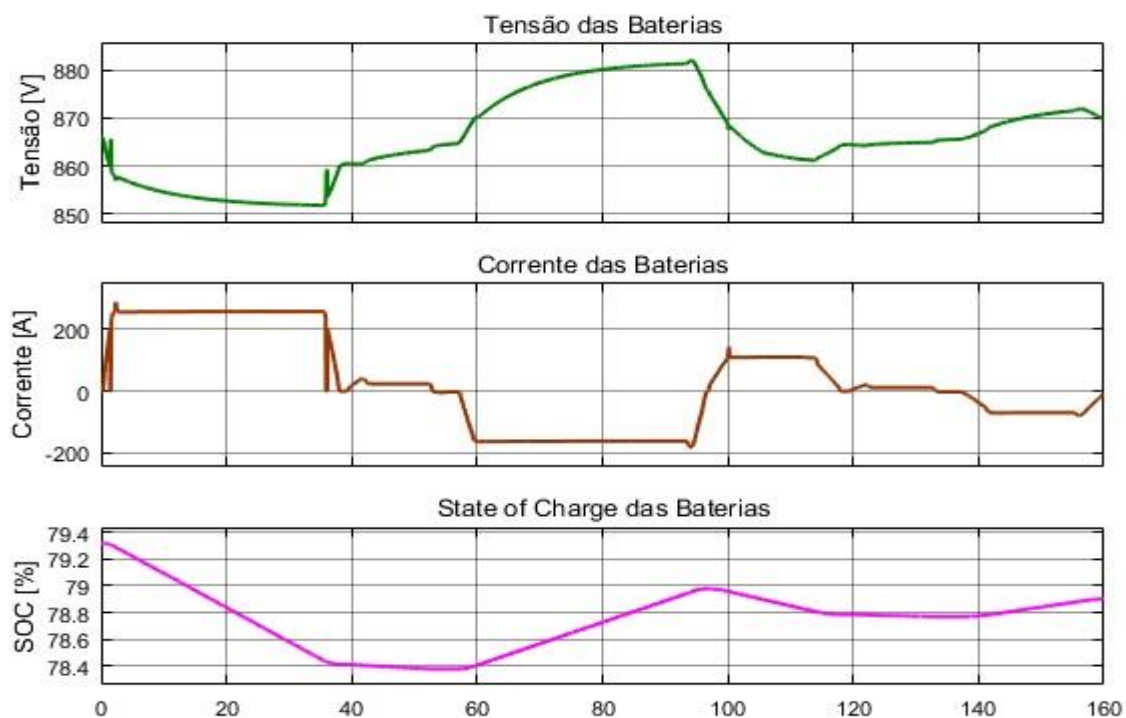


Figura 4.6 – Desempenho do Sistema de Baterias.

Capítulo 5

Resultados e Discussão

5.1 – Resultados

Neste capítulo, serão apresentados os resultados das simulações realizadas para um guindaste RTG, considerando diferentes perfis de consumo de energia. As simulações comparam dois modos de operação, o modo diesel, que reflete a operação convencional, e o modo híbrido, que integra o sistema de armazenamento de energia SAE com o grupo gerador.

A Figura 5.1 ilustra os principais resultados analisados:

- Consumo específico de combustível (SFC) dos grupos geradores em g/kWh;
- Consumo total de combustível diesel em grama;
- Emissões totais de CO₂ em kg.

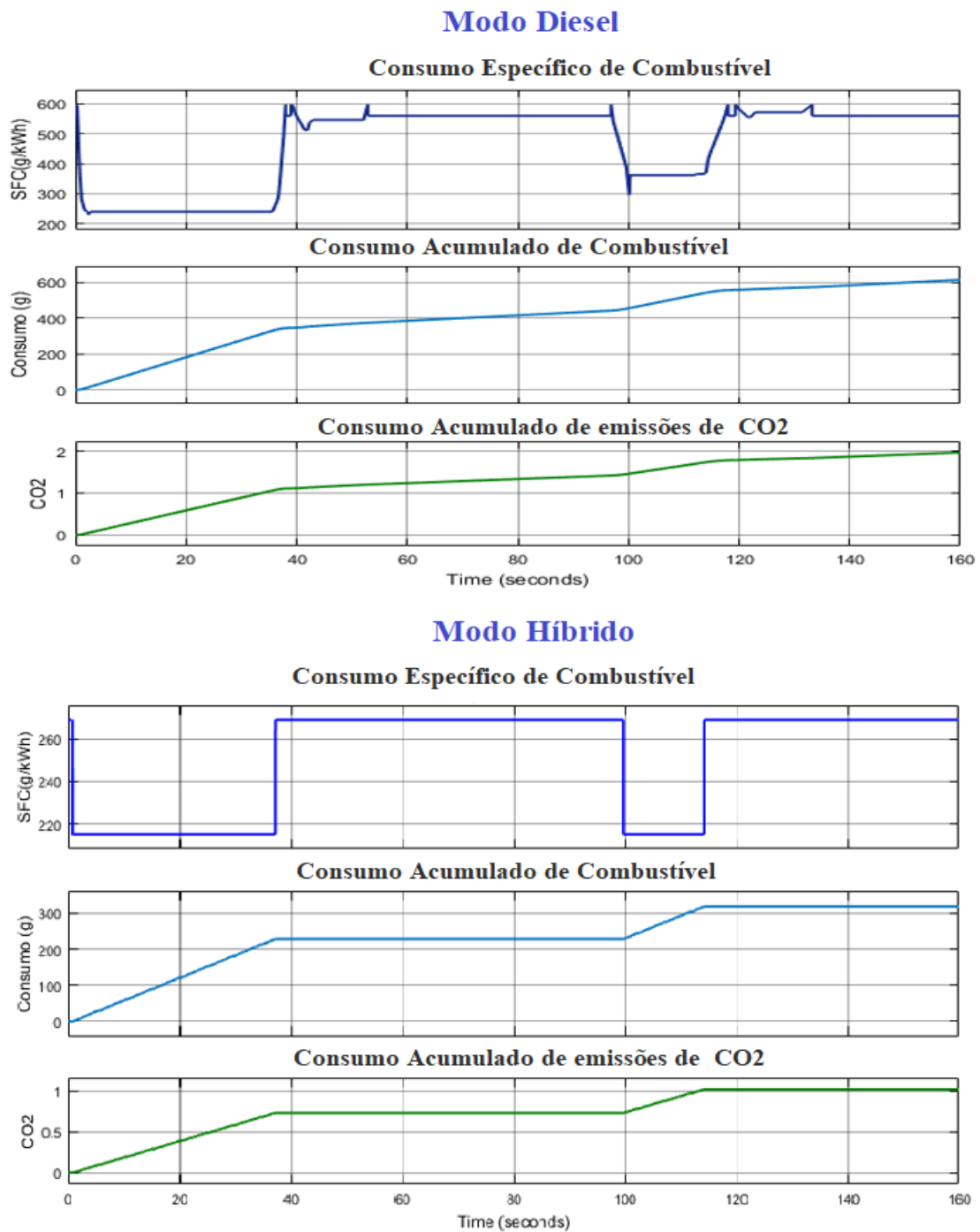


Figura 5.1 – Comparação dos dados de saída entre os modos de funcionamento.

A implementação de um sistema híbrido em guindastes RTG com armazenamento de energia por bateria apresenta uma diferença notável em termos de eficiência e consumo de combustível quando comparado ao modo diesel tradicional.

O SFC é um indicador-chave de eficiência, mostrando a quantidade de combustível necessária para gerar uma determinada quantidade de energia (g/kWh).

No modo diesel, o SFC flutua significativamente, variando entre 400 e 600 g/kWh, o que reflete o funcionamento do motor, e no modo híbrido é consideravelmente mais estável, permanecendo em torno de 220 a 270 g/kWh. Isto representa uma redução de cerca de 45% a 50% no consumo específico de combustível.

No consumo total de combustível, a diferença no consumo total de combustível entre os dois modos está diretamente ligada à eficiência alcançada pelo modo híbrido, graças ao uso inteligente de baterias e gestão mais eficiente do grupo gerador. No modo diesel, o consumo total de combustível foi de aproximadamente 618,7 gramas, enquanto no modo híbrido, o consumo de combustível foi reduzido para 318,7 gramas. Esta redução do consumo total equivale a uma poupança de 50%, o que é substancial para as operações em curso e de longo prazo.

As emissões de CO₂ estão diretamente relacionadas com o consumo de combustível, pois quanto mais combustível é queimado, mais CO₂ é libertado para a atmosfera. O modo híbrido, ao utilizar a energia armazenada nas baterias, reduz a necessidade de queima de combustível, resultando em menores emissões.

No modo diesel, a emissão total é de 2,04 kg de CO₂, enquanto no modo híbrido, a emissão reduz para 1,02 kg de CO₂ no mesmo intervalo de tempo, logo, esta redução representa uma diminuição de aproximadamente 50% nas emissões de CO₂, contribuindo significativamente para a sustentabilidade ambiental.

5.2 – Discussão

5.2.1 – Benefícios verificáveis

Com base nos dados analisados na tabela 5.1, fica claro que o modelo híbrido proposto para o guindaste RTG oferece vantagens significativas em comparação à configuração convencional.

Tabela 5.1 – Resumo dos Resultado das simulações em diesel e híbrido.

Consumo Combustível (g/ciclo)	Emissões CO₂ (kg/ciclo)	Consumo Combustível (g/ciclo)	Emissões CO₂ (kg/ciclo)	Poupança Consumos combustível (g(%))	Poupança emissões CO₂ (kg (%))
Modo Diesel		Modo híbrido			
618.7	2.04	318.7	1.02	300 (50%)	1.02 (50%)

Na análise, verifica-se que a implementação do sistema híbrido, em conjunto com um algoritmo de gestão de geradores, proporcionará um aumento na eficiência energética de até 50%. Este ganho é especialmente relevante nas operações portuárias, onde a redução dos custos operacionais e das emissões poluentes é uma prioridade. Parte dessa melhoria pode ser atribuída ao Sistema de Armazenamento de Energia em Bateria (SAE), que armazena energia e a utiliza em momentos de maior demanda, aliviando os motores a diesel. No entanto, o maior impacto vem da otimização do ponto de operação dos motores, resultando em uma diminuição no Consumo Específico de Combustível (SFC) e garantindo que os geradores funcionem de forma mais eficiente.

5.2.2 – Benefícios não verificáveis

Apesar dos evidentes benefícios financeiros e da redução das emissões de CO₂, este estudo não quantificou a eficiência em operações específicas, como manobras de atracação (incluindo amarração, desacoplagem e posicionamento) e operações de manuseio (como içamento, transporte e armazenamento de cargas). No entanto, a solução híbrida provavelmente traria ainda mais eficiência nesses casos, graças à flexibilidade energética do sistema de armazenamento de energia.

5.2.3 – Investimento e Retorno financeiro

A partir dos dados apresentados na secção 4.2, podemos realizar uma análise sobre o impacto financeiro da implementação do Sistema de Armazenamento de Energia (SAE) projetado para o guindaste RTG, que tem uma capacidade de 233 kWh. Considerando o preço médio das baterias de íon de lítio em 2021[37], que foi de €132,00/kWh, podemos calcular que o investimento inicial necessário para o SAE será de, pelo menos, €30.756,00. No entanto, somando componentes adicionais como conversores bidirecionais, sistema de controle e segurança e outros equipamentos necessários, o custo total do sistema pode ser até 1,5 vezes o valor do banco de baterias, elevando o investimento total para cerca de €50.000,00.

Para realizar a análise financeira, consideram-se os seguintes fatores:

- Tempo restante de vida útil do guindaste: 25 anos;
- Tipo de operação: 60% operações de carga, manobras de atracação, 20% manutenção;
- Dias de operação por ano: 300 dias;
- Preço do combustível diesel (considerando um aumento de 5% ao ano): €1,35/l;
- Consumo diário convencional: 500 litros/dia

Os resultados da análise financeira, ilustrados no quadro 5.2, indicam uma clara comparação entre os custos operacionais de um guindaste sem sistema híbrido e de uma grua equipada com esta tecnologia inovadora. O custo anual de operação do guindaste sem o sistema híbrido é de €202.500,00. Este valor reflete o consumo total de combustível e os custos associados ao funcionamento do equipamento, considerando um consumo diário de 500 litros e um preço de combustível de 1,35€ por litro.

Por outro lado, com a implementação do sistema híbrido, o custo anual de operação do guindaste é reduzido para €101.250,00. Esta diminuição significativa é o resultado de uma redução de 50% no consumo de combustível, passando para um consumo diário de apenas 25 litros. Essas economias não só contribuem para a redução dos custos operacionais, mas também se alinham com as metas de sustentabilidade, diminuindo o impacto ambiental da operação de guindastes.

Além disso, a análise aponta que o tempo necessário para recuperar o investimento inicial de €50.000,00 no sistema híbrido é de menos de primeiro ano anos. Esse período de retorno é um

indicativo de que a adoção da tecnologia híbrida não só é financeiramente viável, mas também promissora em termos de benefícios a longo prazo. Após esse tempo, o guindaste começará a gerar lucro, tornando-se uma opção atraente para investidores que buscam uma combinação de eficiência econômica e sustentabilidade ambiental.

Tabela 5.2 – Cálculos financeiro ao logo dos 25 anos

Ano	Preço Combustível (l)	Consumo Anual Diesel (l)	Consumo Anual Híbrido (l)	Redução de Consumo Anual (l)	Custo Diesel (€)	Custo Híbrido (€)	Redução de Custo (€)
1	1,35	150000	75000	75000	202500	101250	101250
2	1,42	150000	75000	75000	213000	106500	106500
3	1,49	150000	75000	75000	223500	111750	111750
4	1,56	150000	75000	75000	234000	117000	117000
5	1,64	150000	75000	75000	246000	123000	123000
6	1,72	150000	75000	75000	258000	129000	129000
7	1,81	150000	75000	75000	271500	135750	135750
8	1,9	150000	75000	75000	285000	142500	142500
9	1,99	150000	75000	75000	298500	149250	149250
10	2,09	150000	75000	75000	313500	156750	156750
11	2,2	150000	75000	75000	330000	165000	165000
12	2,31	150000	75000	75000	346500	173250	173250
13	2,42	150000	75000	75000	363000	181500	181500
14	2,55	150000	75000	75000	382500	191250	191250
15	2,67	150000	75000	75000	400500	200250	200250
16	2,81	150000	75000	75000	421500	210750	210750
17	2,95	150000	75000	75000	442500	221250	221250
18	3,09	150000	75000	75000	463500	231750	231750
19	3,25	150000	75000	75000	487500	243750	243750
20	3,41	150000	75000	75000	511500	255750	255750
21	3,58	150000	75000	75000	537000	268500	268500
22	3,76	150000	75000	75000	564000	282000	282000
23	3,95	150000	75000	75000	592500	296250	296250
24	4,15	150000	75000	75000	622500	311250	311250
25	4,35	150000	75000	75000	652500	326250	326250
Total		3750000	1875000	1875000	9663000	4831500	4831500

Exemplo para o Primeiro Ano:

1. Preço do Diesel :

$$P_0=1,35 \text{ €}$$

2. Consumo Anual (Diesel e Híbrido):

$$C_{\text{diesel}}=500 \times 300=150 \text{ 000 litros}$$

$$C_{\text{híbrido}}=150 \text{ 000} (1-0,5) =75 \text{ 000 litros}$$

3. Custo Anual de Combustível:

$$\text{Custo}_{\text{diesel}}=1,35 \times 150 \text{ 000}=202 \text{ 500 €}$$

$$\text{Custo}_{\text{híbrido}}=1,35 \times 75 \text{ 000}=101 \text{ 250 €}$$

4. Redução de Custo no Primeiro Ano:

$$R_{\text{custo}}=202 \text{ 500} -101 \text{ 250}=101 \text{ 250 €}$$

Capítulo 6

Conclusões

6.1 – Conclusões Gerais

Com a conclusão deste trabalho, posso afirmar que, diante dos desafios superados, alcancei com satisfação objetivo proposto neste trabalho. Uma análise abrangente da eficiência energética do guindaste RTG foi realizada através de simulações numéricas que abordaram os modos de operação diesel e híbrido. A utilização de um banco de baterias de íons de lítio permitiu criar um sistema híbrido que não só melhorou a eficiência energética em até 50% em comparação com a guindaste RTG convencional, como também otimizou a gestão do grupo gerador a diesel.

A simulação em modo diesel forneceu uma base sólida de comparação, evidenciando a eficácia das soluções propostas. A transição para o modo híbrido demonstrou não só um desempenho superior em termos de consumo de energia, como também evidenciou a viabilidade econômica de um investimento relativamente baixo.

A adoção de tecnologias híbridas, portanto, não só atende aos desafios contemporâneos de eficiência energética, mas também proporciona uma redução significativa nas emissões de gases de efeito estufa. Este trabalho demonstra que é possível promover uma mudança substancial na operação dos guindastes RTG, garantindo o cumprimento de suas funções essenciais ao mesmo tempo em que promove a sustentabilidade e reduz os custos operacionais.

Em resumo, as simulações demonstraram que a integração de sistemas de armazenamento de energia pode transformar as operações do guindaste RTG, resultando em melhorias significativas tanto em termos de desempenho quanto de benefícios ambientais e financeiros.

6.2 – Desenvolvimentos futuros.

Esta dissertação representa apenas um dos passos iniciais para a redução de emissões no setor marítimo. A indústria está à procura de soluções sustentáveis e existem várias oportunidades para desenvolver guindaste RTG com base nas inovações desta investigação. A adoção de tecnologias mais limpas e a melhoria da eficiência energética são cruciais para minimizar o impacto ambiental, tornando a logística mais responsável e eficiente. São apresentadas as seguintes propostas para a continuidade dos trabalhos:

- Exploração do potencial na utilização de *Flow Batteries*;
- Integração de Fontes Renováveis;
- Utilização de Combustíveis Alternativos;
- Integração com Tecnologias de Monitoramento e Manutenção Preditiva.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Hannah Ritchie and Pablo Rosado, “Fossil fuels ,” *Our world in Data*, 2017, Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/fossil-fuels>
- [2] Hannah Ritchie and Pablo Rosado and Max Roser, “CO2 emissions by fuel,” *Our Worldin Data*, 2020, Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/emissions-by-fuel>
- [3] Revista Time e da Statista., “World’s Most Sustainable Companies for 2024.” Accessed: Aug. 27, 2024. [Online]. Available: <https://welectric.pt/2024/07/10/quais-sao-as-empresas-mais-sustentaveis-do-mundo/>
- [4] F. Amílcar Barros Said, “Expansão do Terminal de Contentores Sul do Porto de Leixões e Instalação de Guindastes em Pórticos Móveis-RTG-E’s Telecomandos,” Lisboa: ISEL - Eng. Electrotéc. - Dissertações de Mestrado, Jan. 2019.
- [5] Jahiro Sutherland and Yoan Martínez- López and Carlos A. Rovetto and Elia E.Cano, “Análisis de los movimientos de las operaciones de las grúas RTG en puertos de Panamá usando simulador e-tech,” in *X Congreso internacional de conocimiento e innovación*, Ciudad del Saber, Panamá, Nov. 2020.
- [6] Konecranes, “Konecranes Battery RTG (B-RTG).” Accessed: Dec. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.konecranes.com/>
- [7] C. Antonio and C. Tillmann, *Motores de Combustão Interna e seus Sistemas*. 2013.
- [8] F. Brunetti, “Motores De Combustão Interna vol 1,” 2012, Accessed: Dec. 18, 2024. [Online]. Available: <https://kaiohdutra.wordpress.com/>
- [9] Luís Agostinho, “Emulação de um motor de combustão interna através de um acionamento eletromecânico de velocidade variável utilizando um motor de indução trifásico,” Lisboa: ISEL - Eng. Electrotéc. - Dissertações de Mestrado, Dec. 2014.
- [10] C. J. Oglieve, M. Mohammadpour, and H. Rahnejat, “Optimisation of the vehicle transmission and the gear-shifting strategy for the minimum fuel consumption and the minimum nitrogen oxide emissions,” *Proceedings of the Institution of Mechanical*

- Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 231, no. 7, pp. 883–899, Jun. 2017, doi: 10.1177/0954407017702985.
- [11] W. Niu *et al.*, “Sizing of Energy System of a Hybrid Lithium Battery RTG Crane,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 32, no. 10, pp. 7837–7844, Oct. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2632202.
- [12] H. L. Wei, W. Gu, and J. X. Chu, “The Dynamic Power Control Technology for the High Power Lithium Battery Hybrid Rubber-Tired Gantry (RTG) Crane,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 1, pp. 132–140, Jan. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2816011.
- [13] S. M. Kim and S. K. Sul, “Control of rubber tyred gantry crane with energy storage based on supercapacitor bank,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 21, no. 5, pp. 1420–1427, 2006, doi: 10.1109/TPEL.2006.880260.
- [14] P. Iurii and P. Vladimir, “Estimation of Technical and Economic Efficiency of Using the Supercapacitors in a Frequency-Controlled Crane Electric Drive with a Common DC Link,” in *2020 11th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2020 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Oct. 2020. doi: 10.1109/ICEPDS47235.2020.9249297.
- [15] M. M. Flynn, P. McMullen, and O. Solis, “Saving energy using flywheels,” *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 14, no. 6, pp. 69–76, Nov. 2008, doi: 10.1109/MIAS.2008.929351.
- [16] A. / Revisão, “PLANO NACIONAL ENERGIA E CLIMA 2021-2030 (PNEC 2030).” Accessed: Dec. 18, 2024. [Online]. Available: https://apambiente.pt/sites/default/files/_Clima/Planeamento/20241030_pnec2030_mae_n.pdf
- [17] M. Kermani, E. Shirdare, G. Parise, M. Bongiorno, and L. Martirano, “A Comprehensive Technoeconomic Solution for Demand Control in Ports: Energy Storage Systems Integration,” in *IEEE Transactions on Industry Applications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 1592–1601. doi: 10.1109/TIA.2022.3145769.

- [18] J. A. . Aguado and Armando. Pires, *2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives : Torremolinos (Málaga), Spain, May 11-13, 2011*. IEEE, 2011.
- [19] D. Bayasgalan *et al.*, “Improved RTGC system with voltage compensation converter to reduce fuel consumption,” in *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2012*, 2012, pp. 34–40. doi: 10.1109/ECCE.2012.6342415.
- [20] C. Eduardo Mendes do Carmo and H. Tatizawa, “Potencial dos sistemas de armazenamento flywheel para a qualidade da produção de energia-aplicações,” *Revista tecnologia sociedade*, vol. 15, no. 37, pp. 479–497, Jul. 2019.
- [21] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke, “Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation,” *Appl Energy*, vol. 137, pp. 511–536, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.09.081.
- [22] D. Deng, “Li-ion batteries: Basics, progress, and challenges,” Sep. 01, 2015, *John Wiley and Sons Ltd*. doi: 10.1002/ese3.95.
- [23] J. I. S. Martín, I. Zamora, J. J. S. Martín, V. Aperribay, and P. Eguía, “Energy Storage Technologies for Electric Applications.” [Online]. Available: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/almacenamiento/almacenamiento.html>
- [24] “Energy Storage Technology Descriptions-EASE-European Association for Storage of Energy Lithium-ion Battery.” [Online]. Available: www.ease-storage.eu
- [25] Pedro Pereira, “Descarbonização e otimização energética de um navio hidrográfico através de armazenamento de energia com baterias de íões de lítio,” Lisboa: ISEL - Eng. Electrotéc. - Dissertações de Mestrado, Nov. 2022.
- [26] Eng. Aldo Michelini, *Baterias de Lítio*. 2020. Accessed: Dec. 18, 2024. [Online]. Available: WWW.sta-eletronica.com.br
- [27] A. A. Chellal, J. Gonçalves, J. Lima, V. Pinto, and H. Megnafi, “Design of an embedded energy management system for Li–Po batteries based on a DCC-EKF

- approach for use in mobile robots,” *Machines*, vol. 9, no. 12, Dec. 2021, doi: 10.3390/machines9120313.
- [28] R. Mayer, A. Péres, S. Vidal, and G. Oliveira, “Conversor cc-cc multifásico bidirecional em corrente não isolado aplicado a sistemas elétricos de tração de veículos elétricos e híbridos multiphase bidirectional dc/dc non-isolated converter for electric drive system in electric vehicle and hybrid electric vehicle,” in *Revista Interamericana de Radiologia*, Aug. 2015.
- [29] David Fernandes, “Carregamento de um veículo elétrico através de energia solar Fotovoltaica,” Lisboa: ISEL - Eng. Electrotéc. - Dissertação de Mestrado, Dec. 2023.
- [30] D. A. Pedroso, “Desenvolvimento e controle de um sistema híbrido de geração de Energia Elétrica,” Universidade Federal de Santa Maria- Trabalho de conclusão de Curso de Graduação, 2017.
- [31] E. Sidney Fernandes Mascarenhas Dissertação orientada por and P. Doutora Ana Isabel Lopes Estanqueiro Engenheiro Luís Carlos Rodrigues Júnior, “Modelação dinâmica de rede com integração de centrais eólicas Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e Ambiente.”
- [32] *IEEE Std 421.5-2016 (Revision of IEEE Std 421.5-2005) : IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*. IEEE, 2016.
- [33] Conductix, “BatteryPack BatteryPack-Hybrid-Hybrid More Performance Less Emissions BatteryPack-BE With large battery BatteryPack-Hybrid With medium battery and small diesel genset BatteryPack-FE With small battery and grid power.”
- [34] “Rating guidelines,” 2020. [Online]. Available: www.volvopenta.com
- [35] DAGARTECH, “EU-2.” Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.dagartech.com/pt/grupos-geradores/>
- [36] “Galaxy 233L-AIO-2H 100KW-233KWH liquid cooling IP 54 Battery Energy Storage Cabinet.” [Online]. Available: www.ffdpower.com
- [37] BloombergNEF, “Battery Pack Prices Fall to an Average of \$132/kWh, But Rising Commodity Prices Start to Bite.” Accessed: Sep. 25, 2024. [Online]. Available:

<https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-to-an-average-of-132-kwh-but-rising-commodity-prices-start-to-bite/>.

Anexo A – CÓDIGO USADO NO CONTROLE DO SAE

```
function [P_bateria, P_gerador] = controle_hibrido(P_demanda,SOC_in)

% Inicialização das variáveis de entradas:
carga = P_demanda * 262 / 100; % Cálculo da carga (ajuste conforme a unidade real do sistema)
SOC =SOC_in ; % Inicialização do SOC com o valor fornecido pelo bloco da bateria

% Inicialização das variáveis de saída
    P_bateria = 0; % Inicializando a variação de potência da bateria(em kW)
    P_gerador = 0; % Estado inicial do gerador (0 = OFF, 1 = ON)

% Inicialização de parâmetros
P_gerador_max = 150; % Capacidade máxima do gerador (kW)
P_gerador_nominal = 150; % Potência nominal do gerador (kW)
P_gerador_eficiente = 0.7 * P_gerador_nominal; % Potência eficiente (70% da capacidade nominal)
SOC_min = 20; % SOC mínimo
SOC_max = 80; % SOC máximo permitido

% Lógica de controle para diferentes faixas de carga

% Caso 1: Carga > 80% da carga máxima
if P_demanda >= 80
    % Alta carga: tentar descarregar a bateria se o SOC não estiver no mínimo
    if SOC > SOC_min
        P_bateria = -(carga - P_gerador); % Potência negativa: descarregar
        P_gerador = 1; % Gerador ligado
```

```
else
    % Se o SOC estiver no mínimo, o gerador assume toda a carga
    P_bateria = 0; % Não descarregar a bateria
    P_gerador = 1; % Gerador ligado para fornecer a energia necessária
end

% Caso 2: Carga entre 70% e 80%, Carga moderada, sem ação da bateria (apenas o gerador)
elseif P_demanda < 80 && P_demanda >= 70
    P_bateria = 0;
    P_gerador = 1; % Gerador ligado

% Caso 3: Carga entre 35% e 70%
elseif P_demanda < 70 && P_demanda >= 35
    % Carga média: carregar a bateria se o SOC estiver abaixo do máximo
    if SOC < SOC_max
        P_bateria = P_gerador - carga; % Potência positiva: carregar
        P_gerador = 1; % Gerador ligado
    else
        % Se o SOC já estiver no máximo, não carregar mais
        P_bateria = 0;
        P_gerador = 1; % Gerador ainda ligado
    end

% Caso 4: Carga entre 0% e 35%
elseif P_demanda < 35 && P_demanda >= 0
    % Baixa carga: descarregar a bateria se o SOC não estiver no mínimo
    if SOC > SOC_min
        P_bateria = -carga; % Descarregar a bateria
        P_gerador = 0; % Gerador desligado
    else
        % Se o SOC estiver no mínimo, o gerador fornece a energia
        P_bateria = 0; % Não descarregar a bateria
        P_gerador = 1; % Ligar o gerador para fornecer a energia
    end

% Caso 6: carga negativa (regeneração de energia) - armazena na bateria
```

```
elseif P_demanda < 0
    P_bateria = -carga;
    P_gerador = 0; % Gerador desligado]

else
    P_gerador = P_gerador_eficiente; % Gerador alimenta a carga
    P_bateria = 0;
end

end
```