

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Dimensionamento de baterias para serviços auxiliares

Inês Isabel Guia dos Santos

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor José Nuno Marques Moura Fidalgo

14 de julho de 2023

Resumo

A presente dissertação, realizada em contexto empresarial, na SISINT, teve como objetivo desenvolver uma ferramenta de dimensionamento de sistemas de baterias para serviços auxiliares, bem como o seu sistema de carregamento. Estes sistemas de baterias são responsáveis por alimentar os Sistemas de Alimentação de Corrente Contínua, possibilitando o funcionamento ininterrupto dos Sistemas de Proteção, Comando e Controlo, presentes nas subestações.

Neste contexto, foi desenvolvida uma metodologia que teve como linha orientadora a simplicidade e flexibilidade requerida à utilização da ferramenta computacional. Espera-se que esta solução seja uma mais-valia na otimização e sistematização do processo de dimensionamento atualmente seguido pela empresa.

A metodologia desenvolvida permite a obtenção da configuração ótima do sistema de baterias, de acordo com as diferentes necessidades da subestação, seguindo as normas internacionais do IEEE (IEEE485, IEEE1115 e IEEE1184). Complementarmente, a metodologia concebida é capaz de calcular a corrente mínima que o sistema de carregamento terá de fornecer para alimentar o sistema de baterias dimensionado.

Para atingir os objetivos propostos foi necessário construir, em primeiro lugar, um perfil de consumo, que permite replicar os acontecimentos que ocorrem durante o ciclo de trabalho de uma subestação, e em segundo lugar, determinar o perfil de descarga, considerando a tecnologia de bateria e as características da subestação. Por último, de acordo com as propriedades e particularidades da configuração obtida do sistema de baterias, é dimensionado o sistema de carregamento.

A validação da ferramenta computacional confirmou a sua capacidade em desempenhar as funções requeridas de forma autónoma e eficiente, tendo sido aprovada pelos responsáveis da SISINT.

Palavras-Chave: Sistemas de Proteção, Comando e Controlo; Sistemas de Alimentação de Corrente Contínua; Subestação; Bateria.

Abstract

The present dissertation, developed in a business context, at SISINT, aimed to develop a tool for sizing battery systems for auxiliary services, as well as its charging system. These battery system are responsible for powering the Direct Current Power Systems, enabling uninterrupted operation of the Protection, Command and Control Systems, present in the substations.

In this context, a methodology was developed based on the simplicity and flexibility required to use the computational tool. This solution is expected to be an asset in optimizing and systematizing the dimensioning process currently followed by the company.

The developed methodology allows obtaining the optimal configuration of the battery system, according to the different needs of the substation, following the IEEE standards ((IEEE485, IEEE1115 e IEEE1184). Additionally, the designed methodology is capable of calculating the minimum current that the charging system must provide to supply the dimensioned battery system.

In order to achieve the proposed objectives, it was first necessary to construct a consumption profile that replicates the events that occur during the duty cycle of a substation, and secondly, determine the discharge profile, considering the technology of battery and the characteristics of the substation. Finally, based on the properties and specificities of the obtained battery system configuration, the charging system is sized.

The validation of the computational tool confirmed its ability to perform the required functions autonomously and efficiently, having been approved by the responsables at SISINT.

Keywords: Protection, Command and Control Systems; Direct Current Power Systems; Substation; Battery.

Agradecimentos

Assim chega ao fim a etapa mais desafiante do meu percurso académico, a qual não teria sido concluída sem o apoio incondicional, carinho e participação de várias pessoas.

Começo por expressar o meu profundo agradecimento ao Professor Doutor José Nuno Fidalgo por ter aceite o meu pedido de orientação, pelo total apoio, disponibilidade constante, ajuda e motivação para o desenvolvimento deste trabalho.

Quero também prestar o meu maior agradecimento ao meu orientador externo, o Marco Cunha, por todo o conhecimento transmitido, pela completa disponibilidade e tempo dispensado durante este trabalho, por toda a paciência e compreensão que dispensou.

Aos colaboradores da SISINT, com quem tive o prazer de privar este semestre, agradeço pela boa disposição que me transmitiram, por me terem acolhido tão bem e por terem facilitado a minha integração.

À minha família, em especial aos meus pais, agradeço pelo amor incondicional, pela coragem, dedicação, educação e sacrifício ao desempenharem o papel difícil de mãe e pai.

À minha irmã, Mafalda, obrigada por festejares as minhas conquistas como se fossem tuas, por teres sido o meu amparo nos momentos mais difíceis, por todo o incentivo e apoio incondicional desde sempre.

Ao meu namorado, Zé, agradeço-te por toda a paciência, compreensão, motivação e, por sempre acreditares em mim.

Aos meus colegas de curso, com quem ao longo destes últimos anos partilhei horas de estudo, desespero, e sobretudo horas de diversão e gargalhadas, sem vocês nada teria sido igual.

Queria também agradecer aos meus restantes amigos que me acompanharam ao longo do curso, pelo vosso incentivo, preocupação e boa disposição e sem dúvida que tornaram estes anos inesquecíveis.

Tenho a sorte de puder dizer que tive pessoas inesquecíveis a acompanhar-me nestes últimos anos e, por isso, o meu profundo e sincero agradecimento.

Inês Isabel Guia dos Santos

*“Para ser grande, sê inteiro: nada
Teu exagera ou exclui.
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és
No mínimo que fazes.
Assim em cada lago a lua toda
Brilha, porque alta vive.”*

Fernando Pessoa

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Motivação e objetivos	2
1.3	Estrutura da Dissertação	3
2	Sistema Elétrico de Energia	5
2.1	Introdução	5
2.2	Subestação	7
2.2.1	Nível de Tensão	7
2.2.2	Categorias - Função	8
2.2.3	Tipos de Instalação	8
2.2.4	Forma de Operação	9
2.3	Sistemas de Proteção, Comando e Controlo (SPCC)	9
2.4	Sistemas Auxiliares de Corrente Alternada (SACA)	10
2.5	Sistemas Auxiliares de Corrente Contínua (SACC)	11
3	Análise da Bateria de Corrente Contínua	15
3.1	Conceitos Fundamentais	15
3.2	Parâmetros e Indicadores	16
3.3	Baterias de Chumbo - Ácido	18
3.3.1	Construção	18
3.3.2	Funcionamento	19
3.3.3	Tensão	19
3.3.4	Temperatura	20
3.3.5	Capacidade e Profundidade de Descarga	20
3.3.6	Tipos de Baterias de Chumbo-Ácido	21
3.4	Baterias de Níquel-Cádmio	22
3.4.1	Construção e Funcionamento	23
3.4.2	Tensão	23
3.4.3	Temperatura	24
3.4.4	Efeito de Memória	24
3.5	Métodos de Carregamento	24
3.6	Comparação entre a Bateria de Chumbo-Ácido e a Bateria de Níquel-Cádmio . .	27
4	Metodologia Proposta	29
4.1	Introdução	29
4.2	Perfil de Consumo	30
4.2.1	Definição de Cargas	31

4.2.2	Construção do Perfil de Consumo	33
4.3	Dimensionamento de um Sistema de Baterias	34
4.3.1	Dados de Entrada e Parâmetros Característicos	36
4.3.2	Períodos e Secções	36
4.3.3	Carga e Variação de Carga	37
4.3.4	Duração e Tempo para o Fim da Secção	38
4.3.5	Fator de Classificação da Capacidade K_t	40
4.3.6	Fator <i>Derating</i> da Temperatura, T_t	44
4.3.7	Capacidade Necessária por Secção	48
4.3.8	Margem de Design	49
4.3.9	Fator de Envelhecimento	49
4.3.10	Fator de Correção de Temperatura	49
4.3.11	Valor Corrigido da Capacidade	52
4.4	Dimensionamento do Sistema de Carregamento	53
4.5	Relatório	55
5	Ferramenta Desenvolvida e Base de Dados	57
5.1	Introdução	57
5.2	<i>Software</i>	58
5.3	Estrutura da Ferramenta	58
5.4	Base de Dados	60
5.4.1	Página Inicial	64
5.5	Página do Perfil de Consumo	64
5.6	Preenchimento dos Dados Iniciais do Sistema	66
5.7	Resultados	68
6	Exemplos e Validação da Metodologia	77
6.1	Caso 1	77
6.1.1	Resultados - Ferramenta Computacional	78
6.1.2	Comparação de Resultados	84
6.2	Caso 2	86
6.2.1	Resultados - Ferramenta Computacional	87
6.2.2	Comparação de Resultados	88
7	Conclusão e Trabalho Futuro	93
7.1	Conclusões	93
7.2	Trabalho Futuro	94
	Referências	97
A	Relatórios	101
A.1	Relatório do Dimensionamento do Sistema de Baterias - Caso 1	101
A.2	Relatório do Dimensionamento do Sistema de Carregamento - Caso 1	107
A.3	Relatório do Dimensionamento do Sistema de Baterias - Caso 2	108

Lista de Figuras

1.1	Logótipo da Sisint	2
2.1	Etapas de um Sistema Elétrico de Energia	5
2.2	Rede Nacional de Transporte	6
2.3	Rede Nacional de Distribuição - Grande Porto	7
2.4	Subestação de Guimarães – céu aberto	8
2.5	Quadro Metálico MT da Subestação de Guimarães	9
2.6	Unidade Central e Posto de Comando Local da Subestação de Guimarães	10
2.7	Arquitetura clássica dos SACC	12
2.8	Arquitetura atual dos SACC	12
2.9	Exemplo de um alimentador e os respetivos equipamentos constituintes	13
2.10	Armário de baterias	14
3.1	Operação eletroquímica de carga (a) e de descarga (b)	16
3.2	Exemplo de uma bateria de chumbo-ácido	19
3.3	Efeito da temperatura numa bateria de chumbo-ácido	20
3.4	Relação entre a capacidade de uma bateria, profundidade de descarga e ciclo de vida de uma bateria de placas planas	21
3.5	Exemplo de uma bateria de níquel-cádmio	23
3.6	Característica do carregamento a tensão constante	25
3.7	Característica do carregamento a corrente constante	26
3.8	Característica do carregamento a dois níveis de tensão constante	26
4.1	Passos principais da metodologia	29
4.2	Visão geral do processo de dimensionamento	30
4.3	Algoritmo para a construção do Perfil de Consumo	31
4.4	Gráfico modelo de um perfil de consumo	33
4.5	Algoritmo do dimensionamento de um sistema de baterias	35
4.6	Exemplo ilustrativo - Período vs Secção	37
4.7	Tempo para o fim da secção do período 1	38
4.8	Tempo para o fim da secção do período 2	39
4.9	Tempo para o fim da secção do período 3	39
4.10	Código desenvolvido em VBA para o cálculo do fator K_t	42
4.11	Exemplo da curva do fator K_t para as bateria KPM90P	44
4.12	Curvas típicas do fator <i>derating</i> de temperatura	45
4.13	Expressões das curvas características do fator _{tab:4.6} da temperatura	47
4.14	Curvas características do fator derating da temperatura	48
4.15	Fator de correção da temperatura em função da temperatura do eletrólito: baterias chumbo - ácido a 25°C	51

4.16	Algoritmo do dimensionamento do sistema de carregamento	55
5.1	<i>Softwares</i> utilizados	58
5.2	Estrutura da ferramenta computacional	59
5.3	Menu da ferramenta computacional	60
5.4	Logótipos dos Fabricantes	61
5.5	Modelos de baterias por fabricante	62
5.6	Adicionar nova bateria	63
5.7	Página Inicial da Ferramenta	64
5.8	Acesso à página do perfil de consumo	65
5.9	Quantidade de cargas permanentes	65
5.10	Especificação das cargas permanentes	65
5.11	Quantidade de cargas permanentes	66
5.12	Botão " <i>Create Load Profile</i> "	66
5.13	Campos que o utilizador tem de preencher	66
5.14	Cálculo do número de células e da tensão de fim de descarga	67
5.15	Botões " <i>Battery 1</i> " e " <i>Battery 2</i> "	67
5.16	Passos para a escolha da bateria	68
5.17	Opções disponíveis no campo "Fabricante" e "Química"	68
5.18	Botão " <i>Size</i> "	69
5.19	Validação da tensão de fim de descarga	69
5.20	Mensagem de validação da existência da tensão de fim de descarga	69
5.21	Mensagem de validação da inexistência da tensão de fim de descarga	70
5.22	Tabela do Perfil de Descarga	70
5.23	Consideração de outros fatores de segurança	71
5.24	Botão " <i>Correct Size</i> "	71
5.25	Configuração ideal do sistema de baterias	72
5.26	Página " <i>Temperature Correction Factor</i> "	72
5.27	Página " <i>Factor Derating</i> "	73
5.28	Acesso à página de dimensionamento do sistema de carregamento	73
5.29	Identificação da eficiência de carregamento e da capacidade utilizada do sistema de baterias dimensionado	74
5.30	Campos relativos à carga contínua	74
5.31	Campos relativos ao tempo de carregamento e margem de design	75
5.32	Campos relativos ao fator de altitude	75
5.33	Apresentação da corrente mínima	75
5.34	Exportação dos relatórios do dimensionamento	76
6.1	Identificação do Projeto - Caso 1	78
6.2	Caracterização das cargas - Caso 1	78
6.3	Perfil de Consumo - Caso 1	79
6.4	Parâmetros iniciais e cálculo do número de célula e da tensão de fim de descarga - Caso 1	79
6.5	Bateria a utilizar - Caso 1	80
6.6	Validação da tensão de fim de descarga - Caso 1	80
6.7	Perfil de descarga - Caso 1	81
6.8	Fatores de Segurança - Caso 1	81
6.9	Configuração do Sistema de Baterias - Caso 1	82
6.10	Início do Dimensionamento do Sistema de Baterias - Caso 1	83

6.11	Preenchimento dos campos por parte do utilizador - Caso 1	83
6.12	Corrente mínima - Caso 1	84
6.13	Perfil de Descarga - Caso 2	88
6.14	Cálculo da capacidade final - Caso 2	88
6.15	Perfil de Consumo obtido no <i>software</i> da EnerSys - Caso 2	89
6.16	Dados iniciais no <i>software</i> da EnerSys - Caso 2	89
6.17	Perfil de Descarga obtido no <i>software</i> da EnerSys - Caso 2	90

Lista de Tabelas

3.1	Classificação simples das baterias de chumbo-ácido consoante o tipo	22
3.2	Vantagens e desvantagens das baterias VLRA	22
3.3	Processo de carregamento a tensão constante	25
3.4	Vantagens e desvantagens das baterias de chumbo-ácido e de níquel-cádmio . . .	28
4.1	Dados de Entrada do Sistema	36
4.2	Exemplo de uma tabela de descarga - DataSafe HX - EnerSys	40
4.3	Valores do fator Kt - Bateria DataSafe 12HX540	43
4.4	Pontos retirados das curvas tipo do fator <i>derating</i> de temperatura	45
4.5	Exemplo - Coeficientes para a curva de tempo de descarga entre 1 segundo e 10 minutos	46
4.6	Exemplo - Fatores e erros obtidos para a curva com tempo de descarga entre 1 segundo e 10 minutos	46
4.7	Erros Totais	47
4.8	Fatores de correção de temperatura para baterias de chumbo - ácido para uma temperatura de 25°C	50
4.9	Fatores de correção de temperatura para baterias de chumbo - ácido para uma temperatura de 20°C	52
6.1	Comparação de resultados - Caso 1	85
6.2	Comparação de resultados - Caso 2	91

Abreviaturas e Símbolos

CC	Corrente Contínua
DOD	<i>Depth of Discharge</i>
IED	<i>Intelligent Eletronic Device</i>
MDR	Módulo de Díodos Redutores
MSC	Módulo de Supervisão e Controlo
OCV	<i>Open Circuit Voltage</i>
PCL	Posto de Comando Local
PRE	Produção em Regime Especial
PRO	Produção em Regime Ordinário
PT	Posto de Transformação
RND	Rede Nacional de Distribuição
RNT	Rede Nacional de Transporte
SACC	Sistemas de Alimentação de Corrente Contínua
SEE	Sistema Elétrico de Energia
SEN	Sistema Elétrico Nacional
SLA	<i>Sealed Lead Acid</i>
SOH	<i>State of Health</i>
SOC	<i>State of Charge</i>
SPCC	Sistema de Proteção, Comando e Controlo
UC	Unidade Central
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>
VLRA	<i>Valve Regulated Lead Acid</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

A energia elétrica é determinante e indispensável no quotidiano das sociedades atuais. Ao longo destes últimos anos, assistimos a uma grande evolução e expansão dos sistemas elétricos de energia, impulsionada pelo aparecimento de novas tecnologias de geração de energia, pela necessidade de eletrificação do consumo e pela emergência das redes inteligentes.

As atividades de produção, transporte e distribuição tiveram início quando se estabeleceu a primeira rede elétrica, em 1882 na *Pearl Street Station*, em Nova Iorque, tendo como objetivo primordial a alimentação de uma rede de iluminação pública.

O desenvolvimento energético em Portugal teve também impulso, no início do século XIX, com a iluminação da cidade de Cascais, em comemoração do 15º aniversário do príncipe D. Carlos. Este evento foi o começo da Era de Eletrificação em Portugal, começando a surgir pequenas empresas que se preocuparam essencialmente com a criação do maior número de instalações elétricas [1].

O Sistema Elétrico Nacional (SEN) tem vindo a tornar-se cada vez mais complexo, pelo que o papel das subestações é de extrema importância. As subestações são instalações elétricas, que estão inseridas na rede de distribuição de energia, e englobam um conjunto de equipamentos elétricos, tendo como finalidade principal transformar os níveis de tensão e corrente, permitindo a distribuição de energia a sistemas e linhas. Esta transformação é efetuada nos seguintes níveis de tensão, AT (60 kV) para MT (30/15/10 kV) ou MT/MT. Deste modo, as subestações desempenham um papel essencial no Sistema Elétrico de Energia (SEE), na medida em que, para além de transformar níveis de tensão, protege a rede em situações de curto-circuito, sobrecargas, podendo ainda gerir fluxos de energia. Em caso de falhas numa parte da rede, as subestações permitem reconfigurações da topologia do sistema, assegurando a continuidade de serviço.

Um dos equipamentos mais importantes de uma subestação, são os Sistemas de Proteção, Comando e Controlo (SPCC), responsáveis pelo controlo remoto e local da subestação. O funcionamento ininterrupto destes sistemas é assegurado pelos Sistemas de Alimentação de Corrente

Contínua (SACC). Estes sistemas são equipamentos fundamentais, pois perante um caso de falha elétrica têm como principal função alimentar todos os equipamentos de supervisão, controlo, iluminação de emergência, comunicações e proteção, existentes em subestações, postos de corte AT e MT e postos repetidores. O controlo destas instalações, na maioria dos casos, é feito remotamente, pelo que é importante garantir a alimentação destes equipamentos, visto que existem vários riscos associados ao seu não funcionamento, como, por exemplo perante um caso de falha na rede, uma falha nos SACC impossibilita totalmente a operação da rede por parte do Centro de Condução.

Os SACC são alimentados por baterias de corrente contínua, o que torna imprescindível o seu correto dimensionamento e manutenção. Assim, é neste ponto, que surge a proposta da presente dissertação, cujo objetivo final é o desenvolvimento de uma ferramenta de dimensionamento de um sistema de baterias para serviços auxiliares.

1.2 Motivação e objetivos

Os Sistemas de Proteção, Comando e Controlo têm um papel crucial no SEE e a sua falha poder levar a que uma subestação fique sem controlo, podendo provocar consequências muito graves em vários quadrantes da sociedade.

Em determinadas situações, poderá ocorrer uma falha elétrica, impossibilitando a alimentação dos SPCC através da rede elétrica. Nestes casos, entram em funcionamento as baterias de corrente contínua que permitem alimentar estes sistemas.

Perante este tema, surge a proposta da realização da presente dissertação em contexto de um estágio curricular na SISINT, que é uma empresa associada ao ramo de engenharia, que fornece serviços e soluções integradas de engenharia.



Figura 1.1: Logótipo da Sisint [2]

A metodologia implementada segue as normas internacionais IEEE485 [3], IEEE1115 [4] e IEEE1184 [5].

A norma IEEE485 "*Recommended Practice for Sizing Lead-Acid Batteries for Stationary Application*" descreve o método de dimensionamento de sistemas de baterias de chumbo-ácido. Nesta norma, são caracterizados os fatores que devem ser considerados no dimensionamento, instalação e manutenção destas baterias. Para o dimensionamento de baterias de níquel-cádmio, aplica-se a norma IEEE1115 "*Recommended Practice for Sizing Nickel-Cadmium Batteries for Stationary*

Application", que, tal como a norma anteriormente referida, descreve o método de dimensionamento, mas neste caso para esta tipologia de bateria.

A norma IEEE1184 "*Guide for the Selection and Sizing of Batteries for Uninterruptible Power Systems*" apresenta as características das várias tipologias de baterias, permitindo aos leitores compreender as vantagens e desvantagens de cada tipologia.

Para atingir o objetivo final foram definidas quatro fases essenciais:

1. Estudo das tecnologias de baterias;
2. Sistematização do cálculo das necessidade da instalação;
3. Desenvolvimento da ferramenta de dimensionamento do sistema de baterias;
4. Desenvolvimento da ferramenta de dimensionamento do sistema de carregamento.

A primeira fase foi desenvolvida no âmbito da Unidade Curricular de Iniciação à Investigação, e corresponde ao estudo das tecnologias de baterias, nomeadamente as baterias de chumbo-ácido e as baterias de níquel-cádmio. Nesta fase, pretendeu-se compreender o funcionamento destas baterias, as suas características, vantagens e desvantagens.

A segunda fase consiste no desenvolvimento de perfis de consumo que permitirá caracterizar as variações da carga da subestação e que o sistema de baterias terá de ser capaz de alimentar.

A terceira fase refere-se ao dimensionamento do sistema de baterias, que consiste na determinação do perfil de descarga da bateria escolhida, tendo em conta as características da subestação. Assim, o objetivo desta fase passa por determinar a configuração ideal do sistema de baterias face à capacidade de corrente necessária para a subestação.

A última fase deste projeto surge como complemento e visa estabelecer a corrente mínima necessária que o sistema de carregamento terá de ser capaz de fornecer ao sistema de baterias dimensionado.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação apresenta uma estrutura dividida em 7 capítulos.

O capítulo 1 introduz e contextualiza o tema em estudo, aborda os objetivos previamente estabelecidos e a estrutura do documento.

O capítulo 2 sintetiza alguns dos aspetos fundamentais dos SEE atuais, e que são importantes para a compreensão do papel das subestações. Assim, são descritas as diferentes fases desde a produção até ao consumidor final, referenciando ainda os sistemas que integram uma subestação.

O capítulo 3 introduz o tópico principal do trabalho: a bateria. No início deste capítulo faz-se uma breve descrição sobre o funcionamento, parâmetros e indicadores das baterias. Em seguida,

aborda-se os dois tipos de baterias mais utilizadas para a alimentação de serviços auxiliares: baterias de chumbo-ácido e baterias de níquel-cádmio. Por fim, são abordados alguns métodos de carregamento e as suas características.

O capítulo 4 visa dar a conhecer a metodologia implementada, com recurso a três algoritmos de dimensionamento. Neste capítulo são descritas todas as variáveis, técnicas, métodos e cálculos utilizados nesta análise.

O capítulo 5 descreve a ferramenta computacional desenvolvida em *Excel* e *Visual Basic for Applications*. Este capítulo é relevante, pois identifica todos os procedimentos necessários para a realização de um correto dimensionamento.

O capítulo 6 tem como objetivo validar a metodologia proposta, com base num dimensionamento realizado pela SISINT.

Finalmente, no capítulo 7 encontram-se as conclusões finais relativamente ao trabalho desenvolvido, assim como sugestões de trabalhos futuros, com o intuito de melhorar a ferramenta computacional desenvolvida.

Capítulo 2

Sistema Elétrico de Energia

2.1 Introdução

A presente dissertação debruça-se sobre o dimensionamento de baterias para serviços auxiliares presente em subestações. Neste sentido torna-se importante realizar uma breve introdução sobre este tema.

O Sistema Elétrico de Energia (SEE) tem como principal objetivo a disponibilização de energia, de acordo com as necessidades dos consumidores. Um SEE divide-se em várias etapas: produção, transporte, distribuição e comercialização. Na figura 2.1 é possível verificar as etapas anteriormente referidas.

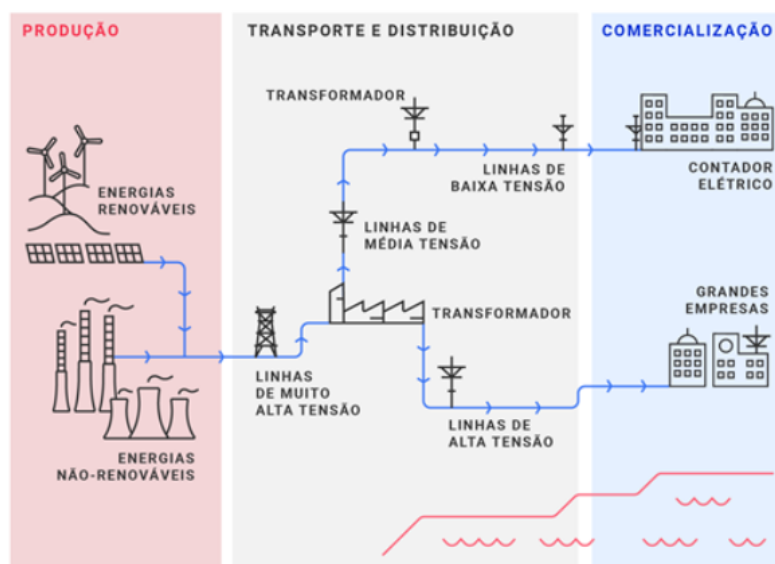


Figura 2.1: Etapas de um Sistema Elétrico de Energia [6]

Em Portugal, a produção de energia elétrica pode ser enquadrada em dois regimes:

- **PRO (Produção em Regime Ordinário):** consiste na produção de eletricidade, tendo por base fontes tradicionais que utilizam recursos como gás, fuel-óleo. As grandes centrais hídricas (>30 MVA) também operam neste regime.
- **PRE (Produção em Regime Especial):** toda a atividade licenciada ao abrigo de regimes jurídicos especiais no âmbito da adoção de políticas destinadas a incentivar a produção de eletricidade, nomeadamente através de recursos endógenos renováveis ou de tecnologias de produção de calor e eletricidade [7].

A Rede Nacional de Transporte (RNT) é responsável, tal como o próprio nome indica, pelo transporte de energia em Portugal, onde são utilizados três níveis de tensão 150 kV, 220 kV e 400 kV. Através da rede de transporte, figura 2.2 a energia elétrica é veiculada até às subestações de distribuição ou entre várias subestações [8].

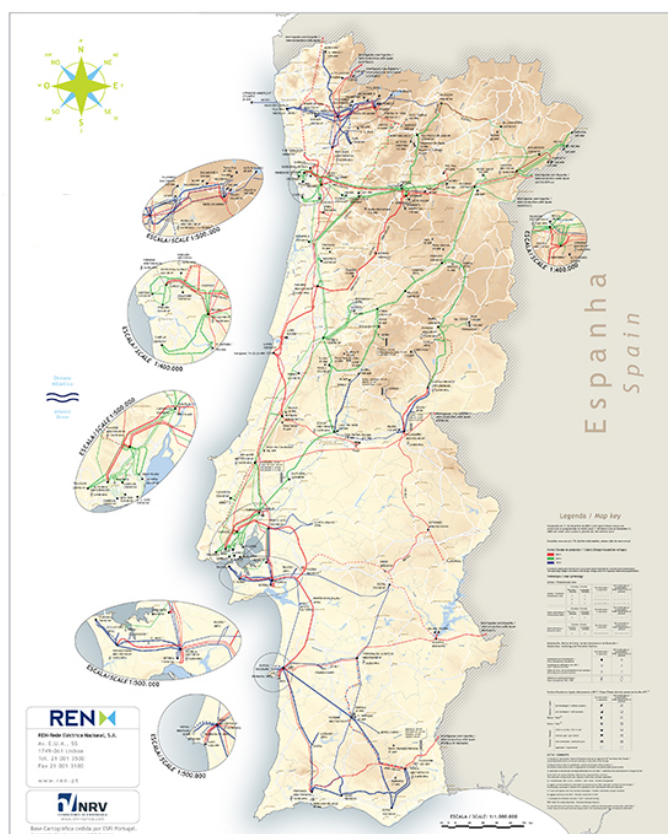


Figura 2.2: Rede Nacional de Transporte [9]

A Rede Nacional de Distribuição (RND) tem como principal função levar energia a todos os consumidores, nos três níveis de tensão, sendo eles de baixa tensão, média e alta. A RND é aplicada para níveis de tensão de 60 kV, 30 kV, 15 kV, 10 kV, 6 kV ¹ e 230\400 V. Na figura 2.3 apresenta-se a RND no grande Porto.

¹O nível de tensão 6 kV é apenas utilizado em linhas mais antigas, tende a ser substituído

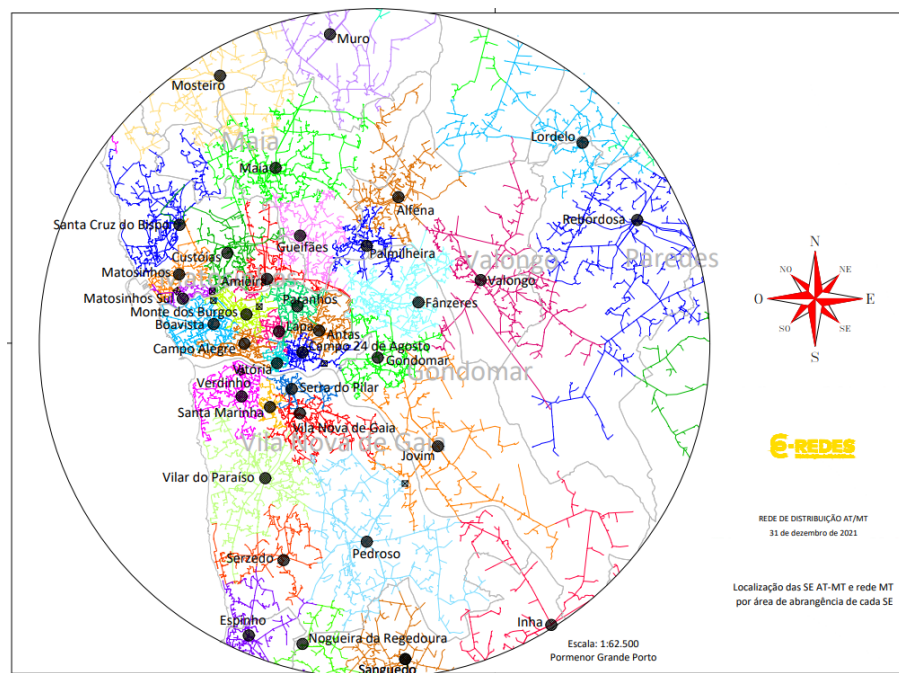


Figura 2.3: Rede Nacional de Distribuição - Grande Porto [10]

A comercialização de energia elétrica, neste momento, encontra-se aberta à concorrência. Os comercializadores têm direito a aceder à rede elétrica nacional, mediante o pagamento de tarifas de acesso estabelecidas pela ERSE (Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos). Assim sendo, entre a produção e a comercialização, a energia passa por subestações, onde é realizada a transformação do nível de tensão, de acordo com o que é necessário.

2.2 Subestação

As subestações são definidas como sendo um conjunto de equipamentos interligados com o objetivo de controlar o fluxo de energia, alterar os níveis de tensão e corrente elétrica e fornecer proteção e comando ao sistema.

2.2.1 Nível de Tensão

Quanto ao nível de tensão uma subestação pode ser classificada em quatro categorias:

- **Baixa Tensão:** Postos de Transformação (PT) que tenham uma tensão até 1 kV, ou seja 230 V e 400 V;
- **Média Tensão:** subestações com níveis de tensão entre 1 kV e 40 kV, ou seja, 10 kV, 15 kV e 30 kV;
- **Alta Tensão:** todas as subestações que tenham uma tensão entre 40 kV e 110 kV, ou seja, 60 kV;

- **Muito Alta Tensão:** todas as subestações que tenham uma tensão superior a 110 kV, ou seja, 150 kV, 220 kV e 400 kV.

2.2.2 Categorias - Função

As subestações podem ser divididas em quatro categorias: distribuição, transporte, manobra e uma combinação das três. Um dos grandes objetivos, no que diz respeito ao Sistema Elétrico, é reduzir o custo, construindo apenas subestações necessárias. Cada uma das subestações deve possuir um design prático e adequado e deve ter uma alta confiabilidade [11].

- **Subestação de Distribuição:** permitem realizar a distribuição primária de energia para os consumidores (habitações, indústrias), e, por isso, encontram-se próximas dos centros de carga. São constituídas por equipamentos que permitem baixar a tensão;
- **Subestação de Transporte:** estas subestações, por sua vez, encontram-se mais próximas dos centros de produção. Podem ser subestações que elevam a tensão, para proporcionar um transporte mais económico de energia, ou então reduzem para a tensão de distribuição;
- **Subestação Seccionadora, de Manobra ou Chaveamento** é aquela que interliga os vários circuitos e dispõe de equipamentos de comutação e controlo, que permitem fornecer proteção e flexibilidade ao sistema.

2.2.3 Tipos de Instalação

Existem subestações a céu aberto (exemplo da subestação de Guimarães - figura 2.4), que requerem a utilização de equipamentos com uma determinada proteção, pois têm de suportar condições atmosféricas adversas. Os equipamentos estando expostos às condições climáticas sofrem mais desgaste, posto isto exigem maior manutenção e a sua eficiência fica comprometida.



Figura 2.4: Subestação de Guimarães – céu aberto [12]

As subestações interiores, por sua vez, são construídas em locais fechados, onde os equipamentos são colocados no interior e, por isso, não estão sujeitos às condições meteorológicas extremas. Também existem subestações blindadas, que, tal como as interiores, são construídas em locais fechados, só que, neste caso, os equipamentos encontram-se completamente protegidos e isolados em óleo ou em gás (ar comprimido ou SF₆).

2.2.4 Forma de Operação

As subestações podem também ser classificadas quanto à forma de operação:

- **Subestação com Operador:** nestas subestações o operador deve ter um alto nível de treino e conhecimento, uma vez que estas operações dependem em grande parte das tomadas de decisões e de controlo do operador. Existem também equipamentos que auxiliam a supervisão [13];
- **Subestação Semi-Automática:** estas subestações possuem computadores locais ou sistemas de segurança eletromecânica para precaver operações erradas por parte do operador local;
- **Subestação Automatizadas:** são supervisionadas à distância.

2.3 Sistemas de Proteção, Comando e Controlo (SPCC)

Para garantir a qualidade e continuidade de serviço, as instalações elétricas precisam de ser controladas em permanência. Deste modo, as subestações incorporam Sistema de Proteção, Comando e Controlo, que asseguram o comando e supervisão desta, no local e à distância, através das funções de proteção, automatismo e encravamento. Este sistema é constituído por vários elementos, sendo estes:

- **Dispositivos Eletrónicos Inteligentes (IED - *Intelligent Electronic Device*):** estes dispositivos são responsáveis pela aquisição de dados e comando da aparelhagem, implementação de funções de automatismo, proteção e controlo [14] - figura 2.5;



Figura 2.5: Quadro Metálico MT da Subestação de Guimarães [12]

- **Unidade Central (UC):** encarregue da execução das funções de comando e controlo de toda a instalação, no local e à distância;
- **Posto de Comando Local (PCL):** é responsável pelo arquivo dos registos do sistema, bem como de todas as funções de visualização e interface. Trata-se, deste modo, de uma interface de operação entre o Operador/Despacho e toda a aparelhagem, da instalação.



Figura 2.6: Unidade Central e Posto de Comando Local da Subestação de Guimarães [12]

As subestações são dotadas de serviços auxiliares, que integram todos os circuitos e fontes de energia BT alternada e contínua, necessários à operação dos equipamentos principais de uma subestação [15].

Os Serviços Auxiliares devem ser confiáveis, e para tal a sua fonte de alimentação deve ser independente e igualmente confiável. É neste contexto que surge o presente trabalho. Assim sendo, a alimentação dos equipamentos e sistemas é feita pelos seguintes serviços:

- Serviços Auxiliares de Corrente Alternada (SACA);
- Serviços Auxiliares de Corrente Contínua (SACC).

2.4 Sistemas Auxiliares de Corrente Alternada (SACA)

Os SACA destinam-se à alimentação em corrente alternada das seguintes instalações das subestações:

- Aquecimento;
- Circuitos de força motriz dos disjuntores e seccionadores;
- Circuito de iluminação (interior e exterior);

- Equipamentos de telecomunicações;
- Comando e sinalização de toda a aparelhagem MAT e AT;
- Equipamentos de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC);
- Retificadores;
- Quadro dos Serviços Auxiliares de Corrente Alternada (QSACA);
- Transformador dos Serviços Auxiliares (TSA) [16].

2.5 Sistemas Auxiliares de Corrente Contínua (SACC)

Os Sistemas de Alimentação de Corrente Contínua, já referidos anteriormente, têm como principal função alimentar todos os equipamentos de supervisão, controlo, iluminação de emergência, comunicações e proteção, existentes em subestações e postos de corte AT e MT. Deste modo, os SACC destinam-se à alimentação em corrente contínua de todos os circuitos que devem ser alimentados em qualquer circunstância, de forma a assegurar as funções essenciais para o funcionamento e segurança da instalação.

Os SACC incorporam dois componentes principais: alimentador e armário de baterias. O alimentador é composto por diferentes módulos, transformador e painéis.

Tipicamente os sistemas CC dos SACC, podem ser caracterizados por quatro níveis de tensão:

- **24 Vcc:** utilizados em sistemas de comando e sinalização de instalações pequenas ou em clientes específicos (ESB e EINGRIF, Irlanda);
- **48 Vcc:** tipicamente usados em sistemas de telecomunicações;
- **110 Vcc:** é o mais utilizado, a E-REDES e a REN utilizam este nível, bem como a maior parte dos países;
- **220 Vcc:** não é muito comum, mas é utilizado em sistemas com elevada carga CC, permitindo a utilização de cabos com menor secção (usado, por exemplo, na Irlanda).

Na figura 2.7 está representado o sistema clássico dos SACC, ainda presente em algumas subestações. Estes sistemas são constituídos por vários módulos retificadores, dependendo da tensão pretendida.

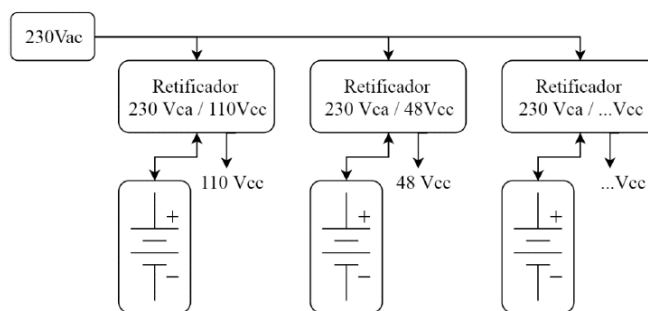


Figura 2.7: Arquitetura clássica dos SACC [17]

Os módulos retificadores estão ligados em paralelo e para cada retificador está associado um grupo de baterias.

Em subestações mais recentes, os SACC têm uma arquitetura diferente da clássica, como pode ser observado na figura 2.8. Nestes casos, existe apenas um retificador e vários módulos conversores, responsáveis por transformar o nível de tensão adequado aos equipamentos.

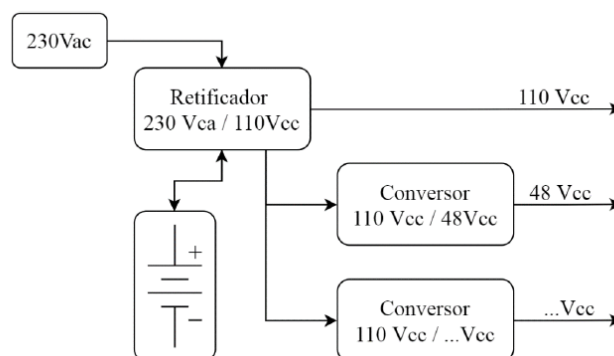


Figura 2.8: Arquitetura atual dos SACC [17]

O alimentador possui, também, um Módulo de Díodos Redutores (MDR), que deve ser dimensionado para a potência máxima de carga e garante que o limite máximo admissível da tensão não é ultrapassado.

Relativamente ao Módulo de Supervisão e Controlo (MSC) deve permitir realizar as seguintes funções:

- Comando, parametrização e monitorização de todo o sistema;
- Disponibilização de medidas, alarmes e respetiva sinalização;
- Registo cronológico de acontecimentos;
- Permitir o acesso remoto do centro de engenharia;

- Telessinalização da falha do MSC [18].

Na figura 2.9, apresenta-se um exemplo de um alimentador e os respectivos equipamentos constituintes:

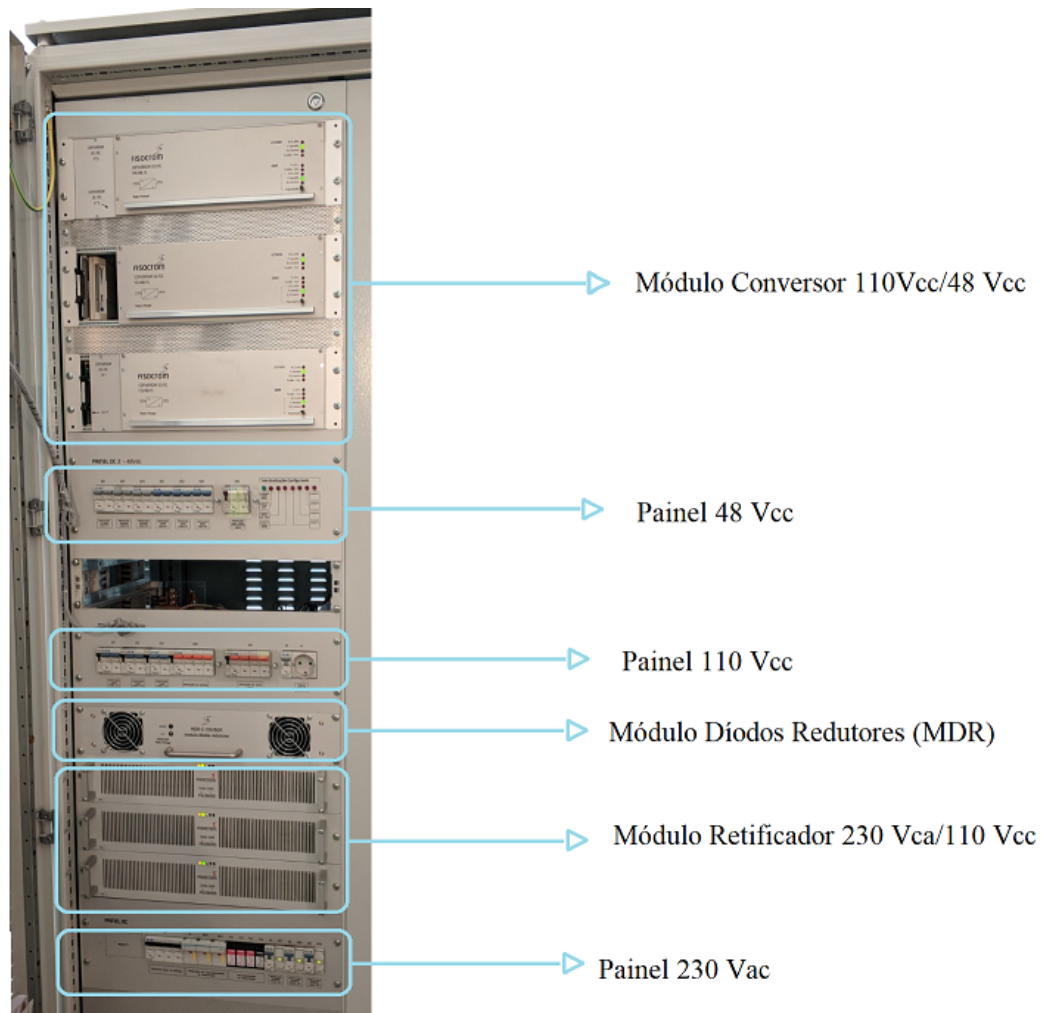


Figura 2.9: Exemplo de um alimentador e os respectivos equipamentos constituintes [19]

Relativamente ao armário de baterias, figura 2.10 estas devem ser instaladas em paralelo com os módulos retificadores e a carga.

O armário deve possuir prateleiras em degrau para possibilitar o fácil acesso para manutenção ou substituição das baterias, deve ser ventilado e selado, de forma a evitar entrada de animais, e, por fim, deve possuir uma estrutura que permita a retenção de eletrólito derramado.



Figura 2.10: Armário de baterias [16]

O capítulo seguinte abordará o objeto de estudo desta dissertação: a bateria.

Capítulo 3

Análise da Bateria de Corrente Contínua

3.1 Conceitos Fundamentais

A bateria é um componente capaz de armazenar energia e consiste numa associação de uma ou mais células eletroquímicas, instaladas em série ou paralelo. Uma célula é definida como sendo a unidade básica para produzir energia elétrica a partir de energia química armazenada no seu interior. Cada célula é constituída por três elementos principais:

- **Ânodo ou elétron negativo:** liberta elétrons para o circuito externo, sofrendo oxidação durante esta reação química;
- **Cátodo ou elétron positivo:** recebe os elétrons oriundos do circuito externo, sofrendo redução durante esta reação eletroquímica;
- **Eletrólito:** é um condutor iónico situado entre os dois eletrodos e permite o fluxo de elétrons.

Em equilíbrio, as concentrações de catiões e aniões são iguais no sistema. Durante a descarga, o terminal positivo é o cátodo e o terminal negativo, o ânodo. Já na carga, ocorre o inverso, o terminal positivo é o ânodo e o terminal negativo é o cátodo. Estes processos encontram-se representados na figura [3.1](#).

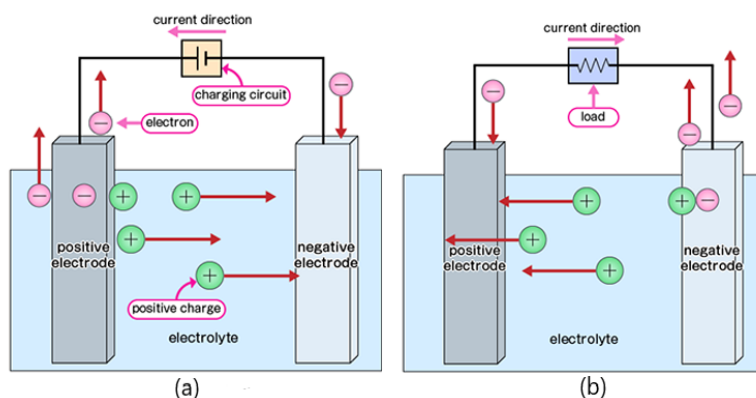


Figura 3.1: Operação eletroquímica de carga (a) e de descarga (b) [20]

As baterias podem ser classificadas em dois tipos: primárias e secundárias. As baterias primárias não são recarregáveis, uma vez que a reação química é irreversível. Estas baterias, depois de consumidas, devem ser descartadas ou recicladas. Requerem manutenção mínima, são econômicas, leves e oferecem um desempenho superior se comparadas às baterias secundárias [21].

As baterias secundárias, por sua vez, podem ser recarregáveis, dado que as reações químicas que ocorrem são reversíveis e, portanto, permitem que os produtos se tornem em reagentes novamente, iniciando outra reação. Têm uma vida mais longa que as baterias primárias, o que as torna mais caras, no entanto são a opção mais eficaz para a utilização a longo prazo. As baterias utilizadas na ferramenta desenvolvida inserem-se nesta última categoria.

3.2 Parâmetros e Indicadores

Com o passar dos anos, as baterias foram evoluindo, com o intuito de corresponder às necessidades e exigências das tecnologias. Contudo, as baterias possuem parâmetros e indicadores básicos equivalentes.

- **Capacidade:** é normalmente definida pelos fabricantes em Ampere-hora (Ah), pressupondo que existe uma dada tensão constante. Corresponde à quantidade de energia que a bateria pode fornecer, à tensão especificada, até ficar totalmente descarregada. Esta quantidade depende de diversos fatores, tais como a corrente de descarga, densidade e temperatura do eletrólito, idade da bateria, entre outros [22].

$$\text{Capacidade(Ah)} = I(\text{A}) \times \text{tempo(h)} \quad (3.1)$$

Associado a este parâmetro surge a classificação em *C - rate*, que diz respeito à taxa de carga e descarga da bateria. Por exemplo, uma taxa de 1C significa que a bateria é totalmente descarregada

numa hora. Um C- *rate* superior a 1C corresponde a um descarregamento mais rápido, e, por sua vez, um C- *rate* menor que 1C, traduz um descarregamento mais lento [23].

- **Ciclo de vida:** a vida de uma bateria é finita e corresponde ao número de ciclos de carga e descarga, antes do não cumprimento de critérios mínimos de funcionamento. A degradação de uma bateria é inevitável e afeta o seu bom funcionamento. Este parâmetro é também afetado pela temperatura, humidade, tipo de bateria, velocidade e profundidade dos ciclos de carga e descarga. Quanto maior for o número de ciclos e a profundidade dos ciclos de descarga, menor será a esperança média de vida de uma bateria [24].
- **Profundidade de descarga (DOD - "*Depth of Discharge*"):** indica a percentagem de bateria que foi descarregada em função da capacidade total. A profundidade de descarga é normalmente expressa em percentagem.
- **Resistência interna:** determina a quantidade de energia que pode ser entregue num determinado intervalo de tempo. Geralmente este valor é especificado pelo fabricante e apresenta variações nos seus valores, de acordo com a fase de carga ou descarga da bateria e a sua idade. Este parâmetro tende a aumentar ao longo da vida de uma bateria, o que faz diminuir a sua eficiência, dado que uma maior parte da energia está a ser convertida em calor [24].
- **Tensão:** a tensão total de um grupo de baterias é baseada no número de células dispostas em série, assim como a tensão nominal de cada uma das células do grupo. A tensão total obtém-se multiplicando a tensão nominal das células pelo número de células conectadas em série. Pode definir-se outros valores de tensão:
 - Tensão de final de descarga: corresponde ao valor de tensão mínima que a bateria pode atingir sem ser danificada;
 - Tensão em circuito aberto (OCV - "*Open Circuit Voltage*"): tensão aos terminais da bateria quando esta não se encontra em carga. Este valor depende da temperatura e do estado de carga da bateria;
 - Tensão de flutuação: é o valor de tensão estabilizado, isto é, o nível de tensão que os retificadores fornecem aos consumidores.
- **Energia Específica:** medida que identifica a quantidade de energia (Wh) por unidade de peso (kg) e permite qualificar e comparar baterias [25].
- **Densidade Energética:** expressa a quantidade de energia armazenada por unidade de volume.
- **Estado de Carga (SOC - "*State of Charge*"):** traduz a capacidade atual da bateria, isto é, a carga disponível da bateria em percentagem. Este valor permite conhecer o tempo que uma dada bateria pode fornecer energia e é necessário que este valor esteja entre valores ótimos.

$$SOC = \frac{\text{Capacidade restante}}{\text{Capacidade disponível}} \quad (3.2)$$

- **Estado de Saúde (SOH - “State of Health”):** traduz a capacidade de armazenamento e fornecimento de energia de uma bateria comparativamente a uma bateria nova. Para calcular este indicador é necessário que as medições sejam feitas sempre com o mesmo valor de estado de carga.

$$SOH = \frac{\text{Capacidade medida}}{\text{Capacidade nominal}} \quad (3.3)$$

3.3 Baterias de Chumbo - Ácido

As baterias de chumbo-ácido foram inventadas em 1859 pelo eletroquímico francês *Gaston Planté* [26]. Estas baterias são recarregáveis, confiáveis, de grande capacidade e de baixo custo, tornando-as económicas para o seu uso em veículos elétrico e fontes de energia ininterruptas (UPS – “Uninterruptible Power Supply”).

3.3.1 Construção

A bateria de chumbo-ácido possui cinco componentes básicos:

- **Recipiente:** pode ser de vidro, madeira revestida de chumbo, borracha dura de composto betuminoso, materiais cerâmicos ou plásticos, que está assente na parte superior, de forma a evitar a descarga do eletrólito. No fundo do recipiente existem quatro nervuras, duas delas suportam as placas positivas e as outras duas, suportam as placas negativas [21];
- **Placas (elétrodos):** as placas positivas são compostas por uma liga de chumbo-ácido que contém dióxido de chumbo poroso como material ativo. As placas negativas, em contrapartida, são constituídas por uma estrutura de chumbo esponjoso. As placas podem ser de três tipos: Planté, planas ou tubulares;
- **Separador:** consiste em folhas de material não condutor, colocadas entre os elétrodos positivo e negativo, isolando-os um do outro;
- **Material ativo:** corresponde ao material presente numa bateria que participa ativamente numa reação química (descarga ou recarga). Os elementos ativos das baterias chumbo-ácido são:
 - Dióxido de chumbo (PbO_2) - material ativo positivo;
 - Chumbo esponjoso - material ativo negativo;
 - Ácido sulfúrico diluído (H_2SO_4) - eletrólito.
- **Terminais:** uma bateria tem dois terminais, o positivo e o negativo, sendo que o terminal positivo é ligeiramente maior que o terminal negativo.

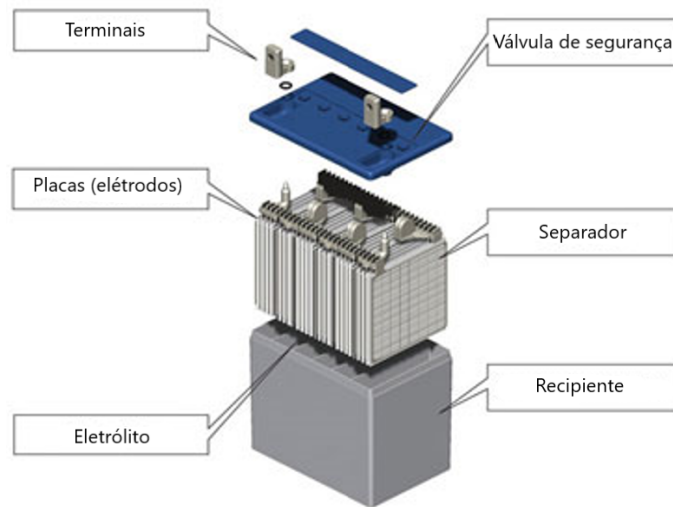
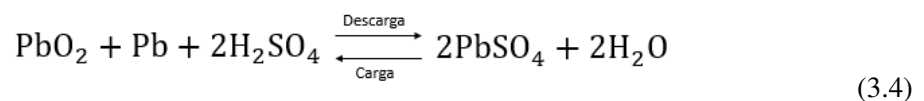


Figura 3.2: Exemplo de uma bateria de chumbo-ácido [27]

3.3.2 Funcionamento

Numa bateria de chumbo-ácido o eletrólito é uma solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4), o material ativo do eletrodo positivo é o dióxido de chumbo (PbO_2) e o do eletrodo negativo é chumbo esponjoso (Pb).

Todas as baterias de chumbo-ácido operam consoante as mesmas reações fundamentais. Durante a descarga é formado sulfato de chumbo (PbSO_4) nos terminais negativo e positivo, através da redução do ácido sulfúrico. Na carga, o ciclo é invertido, o sulfato de chumbo e a água são convertidos novamente em dióxido de chumbo no eletrodo positivo e chumbo esponjoso no eletrodo negativo [24].



3.3.3 Tensão

A tensão nominal de uma célula de uma bateria de chumbo-ácido é 2 volts por célula. A tensão em circuito aberto pode variar entre 1.85 V e 2.1 V, dependendo da gravidade específica do eletrólito [5].

A bateria de chumbo-ácido não deve ser descarregada abaixo de 1,75 V por célula, no entanto perante situações extremas de alta ou baixa temperaturas, a tensão pode atingir 1 V por célula [24].

3.3.4 Temperatura

A capacidade da bateria depende significativamente da temperatura ambiente, e, por isso, torna-se importante manter a temperatura de funcionamento dentro dos limites toleráveis.

As baterias de chumbo-ácido perdem capacidade com a diminuição da temperatura e podem, eventualmente aumentar a capacidade perante temperaturas mais elevadas.

Normalmente estas baterias são capazes de operar entre -20°C e 45°C , sendo que a temperatura ideal de operação situa-se entre 20°C e 25°C [28].

Na figura 3.3 apresenta-se o efeito da temperatura na capacidade das baterias de chumbo-ácido ventiladas.

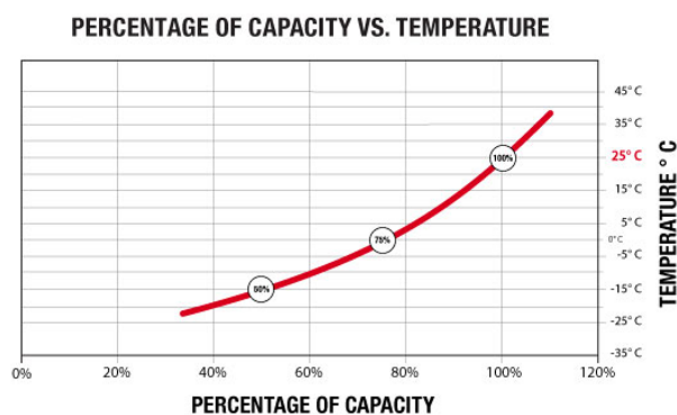


Figura 3.3: Efeito da temperatura numa bateria de chumbo-ácido [29]

3.3.5 Capacidade e Profundidade de Descarga

A capacidade em conjunto com a profundidade de descarga são dois parâmetros fundamentais das baterias, na medida em que afetam a durabilidade destas.

A capacidade varia com a profundidade de descarga: quanto maior for a taxa de descarga, menor é a capacidade da bateria, logo a corrente que esta pode fornecer diminuirá.

Estes parâmetros são influenciados por vários fatores: construção e design da célula, idade, manutenção e temperatura.

A vida útil da bateria (número de ciclos) depende inversamente da profundidade de descarga, assim, de forma a aproveitar a capacidade disponível, considera-se que uma profundidade de descarga de 50% é um bom compromisso. Deste modo, as baterias não devem ser descarregadas mais que metade da sua capacidade.

A figura 3.4 mostra a dependência da capacidade face ao número de ciclos de uma bateria chumbo-ácido.

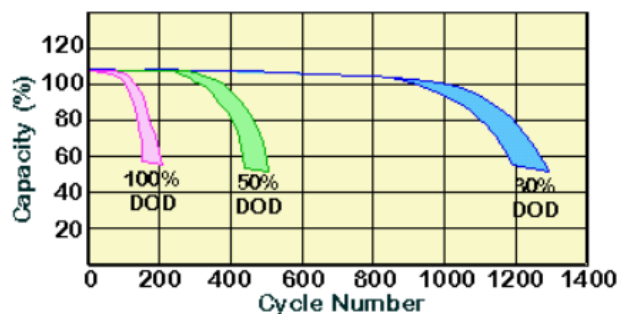


Figura 3.4: Relação entre a capacidade de uma bateria, profundidade de descarga e ciclo de vida de bateria de placas planas [30]

3.3.6 Tipos de Baterias de Chumbo-Ácido

Existem diversas variações das baterias de chumbo-ácido, cada uma possui características específicas. Assim, tendo em conta as baterias de chumbo-ácido existentes, é importante fazer uma escolha adequada atendendo à aplicação requerida.

De uma forma geral, as baterias de chumbo-ácido estão divididas em dois grandes grupos:

- **Baterias de Chumbo-Ácido Ventiladas (VLA):** nestas baterias as placas/eléttodos estão submersas no eletrólito. Permitem a libertação de gases, tornando-as mais capazes de suportar altas temperaturas [31].
- **Baterias de Chumbo-Ácido Seladas (SLA) ou Baterias de Chumbo-Ácido Reguladas por Válvula (VLRA):** As células reguladas por válvula são seladas, com exceção de uma válvula que abre periodicamente para aliviar a pressão interna. Foram desenvolvidas para reduzir a manutenção, nomeadamente na reposição do eletrólito e, neste caso, os níveis do eletrólito são preservados através da recombinação dos gases. Estas baterias podem, ainda, ser divididas em duas categorias:
 - **Baterias com eletrólito de gel:** nestas baterias o eletrólito líquido é imobilizado por uma mistura de sílica, apresentando uma maior resistência a choques e vibrações. Ao contrário das baterias seladas, estas não necessitam de estar obrigatoriamente na posição vertical [32];
 - **Baterias com separador de microfibras de vidro (AGM - "Absorvent Glass MAT"):** o eletrólito, neste caso, é imobilizado a partir da absorção do separador AGM, que é colocado entre o eléctrodo negativo e positivo. O separador AGM é constituído por microfibras de vidro, dando origem a uma estrutura porosa, que admite a passagem de oxigénio durante o processo de recarga, reduzindo as perdas de água [33].

A tabela 3.1 apresenta uma classificação simples das baterias de chumbo-ácido consoante o tipo.

Tabela 3.1: Classificação simples das baterias de chumbo-ácido consoante o tipo [34]

Grupo		Baterias de Chumbo-Ácido Ventiladas (VLA)			Baterias de Chumbo-Ácido Seladas (SLA ou VRLA)	
Tipo		Planté	Plana	Tubular	Plana	Tubular
Placa Positiva	Construção	Chumbo puro	Chumbo antimônio/liga de cálcio em rede	Chumbo antimônio/liga de cálcio em espinha	Liga de cálcio em rede	Liga de cálcio em espinha
	Material Ativo	PbO ₂ proveniente da placa de chumbo puro	PbO ₂	PbO ₂	PbO ₂	PbO ₂
Placa Negativa	Construção	Liga de chumbo antimônio	Liga de cálcio em rede	Liga de cálcio em rede	Liga de cálcio em rede	Liga de cálcio em rede
	Material Ativo	Chumbo esponjoso	Chumbo esponjoso	Chumbo esponjoso	Chumbo esponjoso	Chumbo esponjoso
Eletrolito	Química	Solução de ácido sulfúrico em água pura			Solução de ácido sulfúrico em água pura	
	Recipiente	Líquido livre			Líquido imobilizado utilizando:	
					AGM	Gel
	Ventilação	Livre			Válvula de baixa pressão regulada (VR)	

Na tabela 3.2, apresentam-se as vantagens e desvantagens associadas às baterias VLRA.

Tabela 3.2: Vantagens e desvantagens das baterias VLRA

Vantagens	Desvantagens
Manutenção reduzida	Tempo de vida mais curto
Não sujeita ao efeito de memória	Mais sensível a altas temperaturas
Capacidade de funcionamento a taxas elevadas de descarga	Densidade de energia relativamente baixa
Custo relativamente reduzido	Ocorrência de fugas térmicas
Disponível em vários tamanhos e níveis de tensão	Não pode ser armazenada descarregada

3.4 Baterias de Níquel-Cádmio

As baterias de níquel-cádmio (NiCd), tal como as baterias de chumbo-ácido são um tipo de baterias de armazenamento. Estas baterias foram inventadas em 1899, por *Waldemar Jungner*, na Suécia [26].

3.4.1 Construção e Funcionamento

A construção da bateria de níquel-cádmio é similar à da bateria de chumbo-ácido. Existem diferentes tipos de baterias NiCd, nomeadamente, as do tipo placas de bolso, ventiladas, seladas entre outras, sendo que as mais utilizadas são as do tipo bolso.

Estas baterias possuem uma caixa externa, que geralmente são em plástico, mas em algumas situações mais severas podem ser em aço inoxidável.

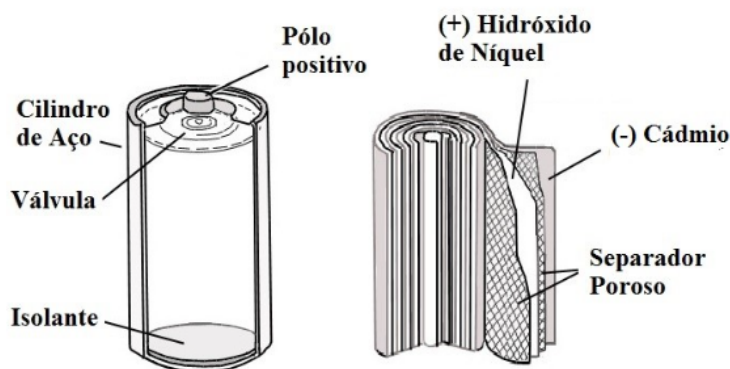
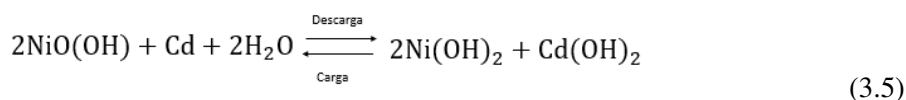


Figura 3.5: Exemplo de uma bateria de níquel-cádmio [35]

Os materiais ativos destas baterias são o hidróxido de níquel ($\text{Ni}(\text{OH})_2$), presente no eletrodo positivo e o hidróxido de cádmio ($\text{Cd}(\text{OH})_2$), no eletrodo negativo. Os eletrodos encontram-se separados por uma membrana que permite a passagem dos eletrões e iões entre eles, e que por sua vez estão imersos num eletrólito.

O eletrólito nesta bateria não faz parte da reação química, logo a gravidade específica não altera durante a carga e descarga.

A expressão 3.5 diz respeito ao processo de carga e descarga de uma bateria de níquel-cádmio.



3.4.2 Tensão

A célula de níquel-cádmio tem uma tensão nominal de 1.20 V, mas, logo, após o carregamento, a tensão por célula pode rondar os 1.40 V.

Nestas baterias, durante o processo de descarga, a tensão não deve ser inferior a 1 V por célula [5].

3.4.3 Temperatura

Uma das grandes vantagens associadas às baterias NiCd é o facto de conseguirem operar a altas e baixas temperaturas. Estas baterias são capazes de operar entre -20°C e 65°C , sendo que tal como as baterias de chumbo-ácido, a temperatura ideal deve estar entre os 20°C e 25°C [36].

3.4.4 Efeito de Memória

O efeito memória ocorre nas baterias de Níquel-Cádmio e é um fator limitante. Este efeito afeta células que são descarregadas parcialmente de forma repetida, fazendo com que, depois, as células apenas descarreguem até ao nível em que foram previamente descarregadas. Este fator leva a que a bateria seja carregada com maior frequência.

Durante o carregamento de uma bateria NiCd existe a formação de microcristais de cádmio e, o facto de a bateria ser descarregada apenas parcialmente leva a que sejam formados cristais cada vez maiores na parte não descarregada da célula. À medida que os cristais crescem, a tensão diminui, pelo que prejudicam a condutividade do material, o desempenho da bateria e a sua vida útil [5].

3.5 Métodos de Carregamento

O desempenho e a vida útil das baterias dependem do seu carregamento e, por isso, é importante seleccionar um carregador de bateria adequado, bem como o método de carregamento.

A seleção do método de carregamento adequado depende da utilidade pretendida, de considerações económicas, do tempo de recarga, da profundidade de descarga e do tempo de vida útil expectável.

Existem vários tipos de carregamento, no entanto vão ser abordados, seguidamente, os três métodos mais utilizados.

- **Tensão Constante**

Este é o carregamento mais comum e o mais recomendado para baterias de chumbo-ácido. O método de carregamento a tensão constante consiste em aplicar uma tensão constante na bateria, limitando a corrente de carga inicial. O gráfico-tipo correspondente a este método, encontra-se na figura 3.6 e o processo de carregamento pode ser resumido na tabela 3.3

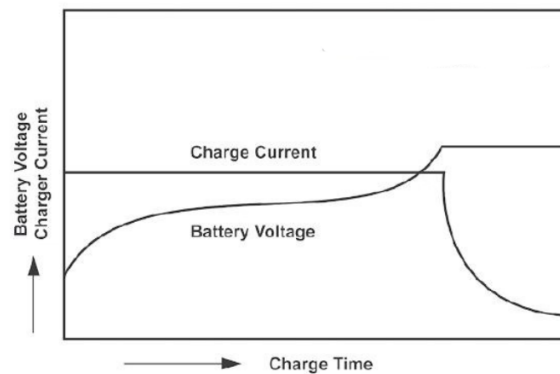


Figura 3.6: Característica do carregamento a tensão constante [37]

Numa fase inicial, é necessário um valor elevado de corrente para que a tensão possua um valor constante. À medida que a bateria carrega e a sua tensão interna aumenta, a corrente diminui. Quando a bateria atinge a carga completa, a corrente diminui exponencialmente [38].

Após ser atingida a carga máxima, a bateria pode permanecer ligada ao carregador até que seja necessária a sua utilização.

A tensão de carga deve estar de acordo com a especificada pelo fornecedor e pela respetiva temperatura, normalmente a tensão de carga é ligeiramente superior à nominal.

Tabela 3.3: Processo de carregamento a tensão constante

Estado do Carregamento	Método de Controlo	Estado da Bateria	
1. Pré - carregamento	O carregamento inicia	A capacidade e tensão da bateria são baixas	
2. Carregamento a tensão constante	O carregamento a tensão constante implica uma corrente de carga mais elevada (normalmente a tensão é ligeiramente superior ao valor nominal)	A tensão da bateria aumenta e a corrente diminui	
3. Carregamento concluído	Quando a tensão da bateria atinge o valor pretendido	A tensão especificada da bateria é atingida e a corrente diminui exponencialmente	

Em determinadas situações, pode ser ativado o modo "*Boost*"; durante um curto intervalo de tempo, de forma a diminuir o tempo de carregamento ou para certificar que a bateria está totalmente carregada [39].

- **Corrente Constante**

O carregamento a uma corrente constante é outro método simples e eficaz, relativamente ao tempo de carregamento e ao desempenho da bateria no ciclo seguinte.

Este método utiliza uma corrente baixa constante para carregar a bateria e a tensão de carga é determinada pelas características da célula.

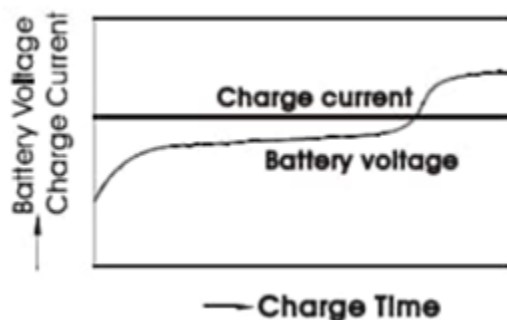


Figura 3.7: Característica do carregamento a corrente constante [39]

- **Dois Níveis de Tensão Constante**

Este método utiliza duas fases de tensão constante, sendo que, na primeira fase a tensão é mais elevada. Quando é atingida uma determinada tensão de carga, surge a segunda fase, onde a tensão é mais baixa, figura 3.8.

Este processo é recomendado quando se pretende carregar uma bateria de chumbo ácido num curto período de tempo.

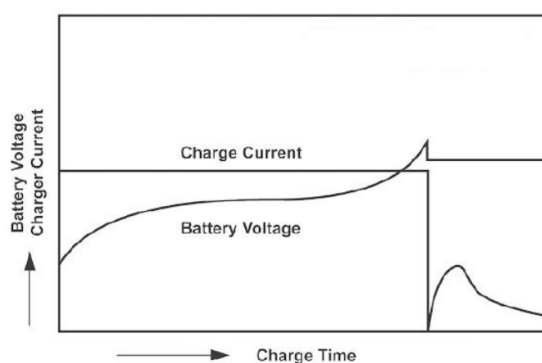


Figura 3.8: Característica do carregamento a dois níveis de tensão constante [37]

3.6 Comparação entre a Bateria de Chumbo-Ácido e a Bateria de Níquel-Cádmio

Atualmente, as baterias mais utilizadas em subestações são as baterias de níquel-cádmio, sendo que em algumas instalações mais antigas, ainda existem as baterias de chumbo-ácido.

As baterias de chumbo-ácido possuem a grande vantagem de terem um preço consideravelmente reduzido, e por esse motivo são uma escolha adequada, quando o peso não é um fator determinante.

No que diz respeito aos ciclos completos de carga/descarga, estes são inconvenientes para a capacidade das baterias chumbo-ácido, todavia as baterias NiCd não são prejudicadas por este fator.

Um inconveniente das baterias de chumbo-ácido, é mesmo o chumbo, que, nos dias de hoje, é maioritariamente utilizado no fabrico de bateria. Ora, o chumbo é tóxico para o ser humano, uma vez que a sua exposição pode causar efeitos nocivos, particularmente no sistema nervoso, medula óssea e rins. Assim sendo, o manuseamento de baterias de chumbo-ácido deve ser feito, tendo em conta alguns cuidados [24].

O cádmio é um metal pesado e muito tóxico, e, mesmo em pequenas quantidades, pode provocar vários problemas de saúde, tais como: disfunção renal, cancro, problemas pulmonares e mutações genéticas. Por esta razão, existem limites para a utilização deste material na composição das baterias.

Relativamente ao carregamento, as baterias de níquel-cádmio permitem um carregamento mais rápido, visto que um carregamento mais lento propicia a formação de cristais, fazendo diminuir o desempenho da bateria e a sua vida útil. As baterias de chumbo-ácido diferem das de NiCd, na medida em que é necessário ter mais em atenção na limitação da tensão.

Na tabela 3.4, apresentam-se as vantagens e desvantagens associadas a cada uma das tecnologias.

Tabela 3.4: Vantagens e desvantagens das baterias de chumbo-ácido e de níquel-cádmio

	Níquel-Cádmio	Chumbo-Ácido
Vantagens	- Carregamento simples e fácil; - Elevado número de ciclos de carga e descarga; - Armazenamento e transporte simples; - Boa performance a temperaturas altas; - Não se deterioram significativamente em condições de operação desfavoráveis.	- Barata e simples de fabricar; - Tecnologia madura e confiável; - Baixa taxa de auto-descarga; - Manutenção reduzida; - Suporta taxas de descarga elevadas sem impacto significativo na capacidade - Não sofre efeito de memória.
Desvantagens	- Baixa densidade de energia quando comparada com baterias mais modernas; - Efeito de memória; - Problemática para o meio ambiente, contém metais tóxicos; - Possui uma taxa de auto-descarga relativamente alta.	- Não deve ser armazenada na condição descarregada; - Baixa densidade de energia; - Permite apenas um número limitado de ciclos de descarga completa; - Mau desempenho a altas temperaturas; - Limitações no transporte, existem riscos ambientais associados ao derrame.

Capítulo 4

Metodologia Proposta

4.1 Introdução

Este capítulo tem como finalidade apresentar a metodologia utilizada na implementação da ferramenta, que permite o dimensionamento de um sistema de baterias e o seu sistema de carregamento.

A metodologia é composta essencialmente por três algoritmos distintos para as três fases do processo de dimensionamento, sendo que no final todos os algoritmos serão validados com base num caso real, figura 4.1.

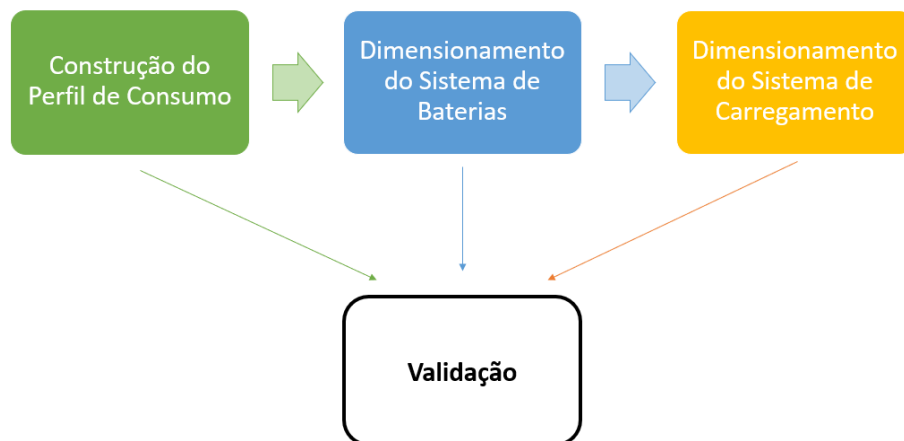


Figura 4.1: Passos principais da metodologia

A metodologia proposta, tal como já foi referido anteriormente, tem como objetivo cumprir os requisitos inicialmente propostos, otimização e automatização do processo de dimensionamento, atualmente seguido pela empresa. Esta é tida como consistente, visto que segue as normas do IEEE e resulta de um conjunto de informações e ideias retiradas do atual processo de dimensionamento da SISINT.

Na figura 4.2 expõe-se um diagrama que apresenta uma visão geral do processo.

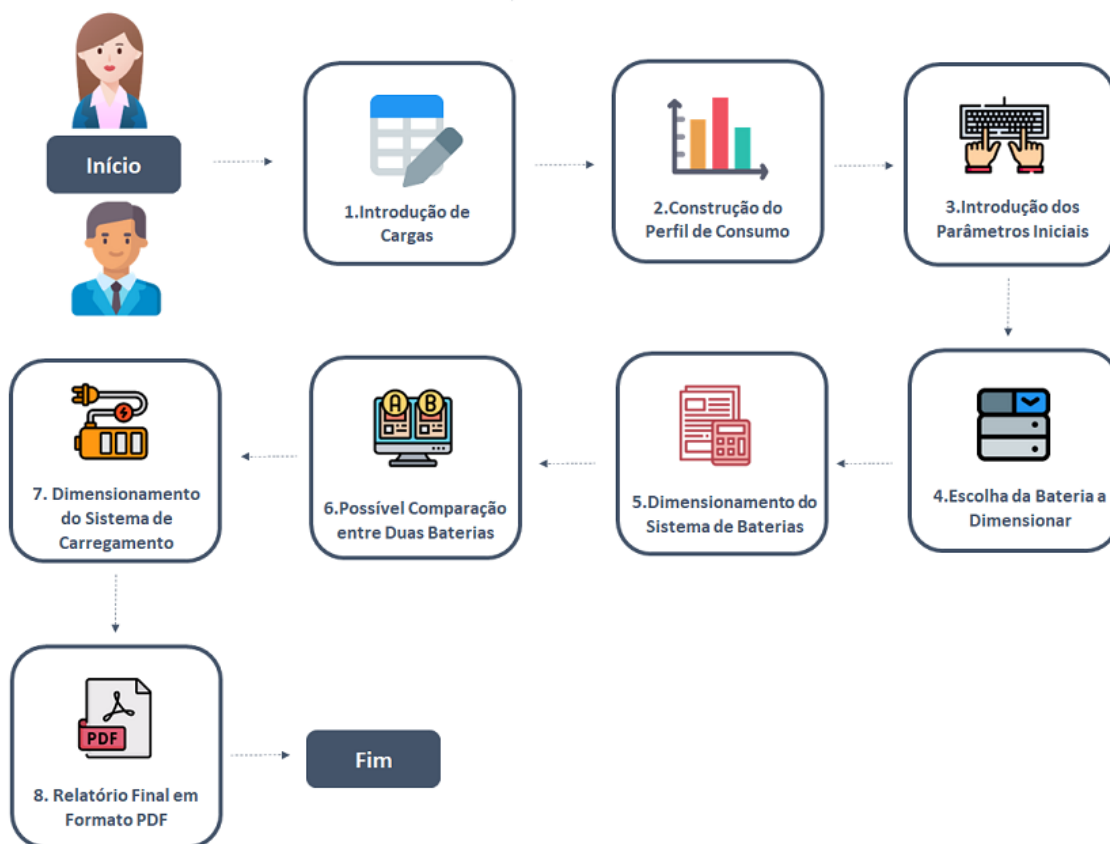


Figura 4.2: Visão geral do processo de dimensionamento

4.2 Perfil de Consumo

Como ponto de partida de todo o processo de dimensionamento importa conhecer as necessidades da instalação, que permitirão a construção de um perfil de consumo.

Um perfil de consumo corresponde a uma representação gráfica das variações de previsão/ estimação de consumo de uma instalação ao longo do seu ciclo de trabalho. A duração do ciclo de trabalho corresponde ao tempo necessário para que a subestação possa retomar as condições de operação normais e/ou rearranjar a rede para isolar a instalação.

Assim sendo, a construção deste perfil é fundamental, na medida em que permite ultrapassar a grande dificuldade em interpretar o comportamento do consumo de uma instalação ao longo do tempo.

Para esta fase do processo foi desenvolvida a seguinte metodologia:

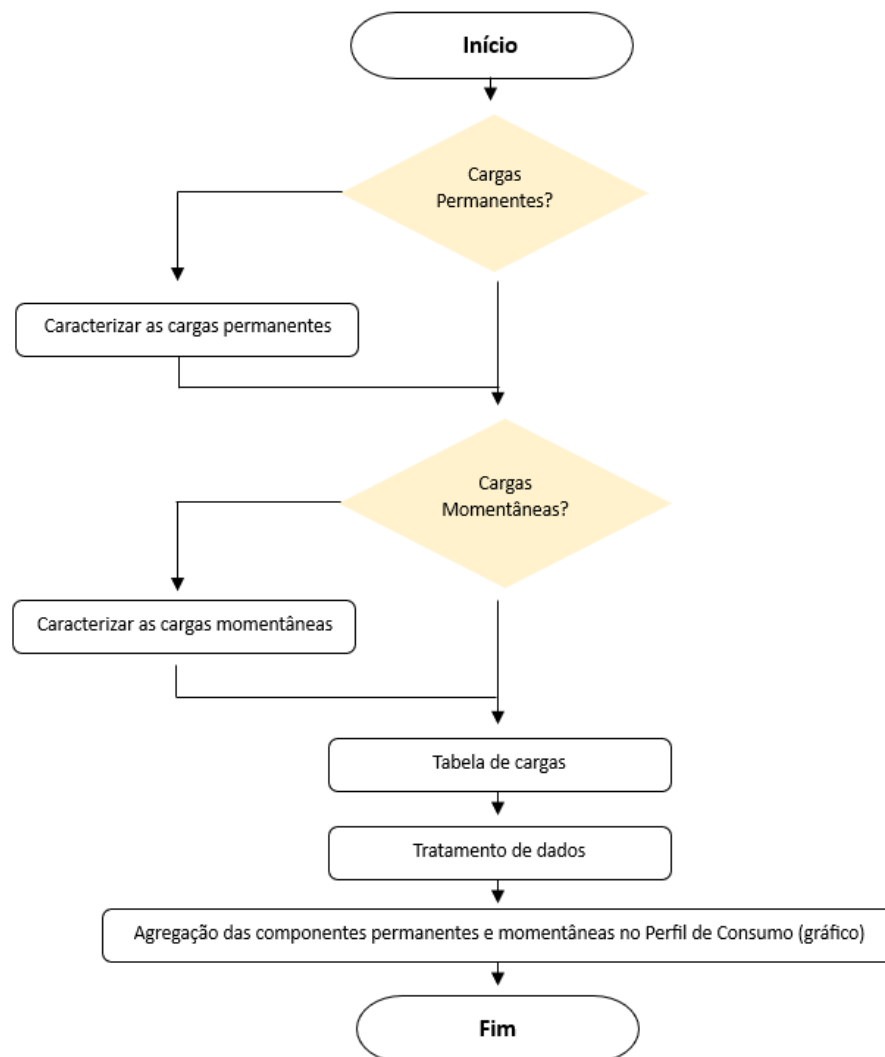


Figura 4.3: Algoritmo para a construção do Perfil de Consumo

4.2.1 Definição de Cargas

As cargas de corrente contínua alimentadas por baterias podem ser classificadas tendo em conta a sua duração. Estas podem ser divididas em cargas contínuas ou descontínuas, sendo que as últimas, podem ainda ser do tipo cargas momentâneas.

Esta divisão é relevante, na medida em que a bateria a ser dimensionada dependerá do tipo de cargas existentes.

- **Cargas Contínuas** - as cargas contínuas são cargas que operam continuamente durante todo o ciclo de trabalho e são constantes. Tipicamente, as cargas contínuas são as seguintes:
 - Iluminação;
 - Motores de operação contínua;
 - Luzes de indicação;
 - Bobinas continuamente energizadas;
 - Sistemas de comunicação;
 - Fontes de alimentação [3].
- **Cargas Descontínuas** - as cargas descontínuas também conhecidas como cargas intermitentes, podem surgir a qualquer instante do ciclo de trabalho e permanecer durante um determinado intervalo de tempo. Estas cargas podem ser removidas automaticamente, pelo operador, ou permanecer até ao fim do ciclo de trabalho. De seguida, apresentam-se alguns exemplos de cargas descontínuas:
 - Motores de emergência;
 - Motores do sistema de ventilação;
 - Operações de aparelhagem;
 - Outras cargas CA ligadas à saída do inversor [4].
- **Cargas Momentâneas** - as cargas descontínuas com duração inferior a um minuto são habitualmente classificadas como cargas momentâneas. Normalmente, estas são cargas elevadas, e por isso, torna-se importante considerá-las, visto que podem ter impacto significativo no desempenho do sistema de baterias. De seguida apresentam-se alguns exemplos de cargas momentâneas:
 - Operações de manobra;
 - Operações de válvulas acionadas por motores;
 - Operações de comutação motorizadas;
 - Intermitência do campo dos geradores;
 - Correntes de arranque de motores;
 - Correntes de irrupção [3].

A metodologia concebida agrupa as cargas contínuas e descontínuas, denominando o conjunto de cargas permanentes. Deste modo, apenas existem dois tipos de cargas distintas no algoritmo: cargas permanentes, cuja duração é superior a 1 minuto e cargas momentâneas, com uma duração igual ou inferior a 1 minuto.

No que diz respeito às cargas momentâneas, é necessário ter em especial atenção, pois estas cargas têm uma grande influência no dimensionamento. A metodologia permite a livre escolha do utilizador relativamente à duração e ao instante de ocorrência destas cargas, no entanto recomenda-se a seguinte parametrização:

- **Duração:** máxima admissível - 1 minuto;
- **Instante de início:** no último minuto do ciclo de trabalho.

Esta abordagem tem como objetivo assegurar a capacidade de alimentar o sistema no cenário mais desfavorável, pois considera-se que no último minuto de funcionamento das baterias, estas terão que suportar um pico de corrente após terem sofrido descarga ao longo de todo o ciclo de trabalho.

4.2.2 Construção do Perfil de Consumo

Após a definição e caracterização das cargas, a metodologia realiza o processamento dos dados a fim de construir o gráfico do perfil de consumo.

O gráfico escolhido foi o do tipo colunas, uma vez que é o gráfico mais adequado para representar as alterações do valor da corrente ao longo do ciclo de trabalho, possibilitando uma análise visual e uma comparação direta entre valores.

Na figura 4.4 apresenta-se um exemplo de um gráfico de um perfil de consumo de uma subestação. De notar que este é um exemplo complexo, dado que normalmente um perfil de consumo é apenas composto por duas cargas, uma permanente e uma momentânea.

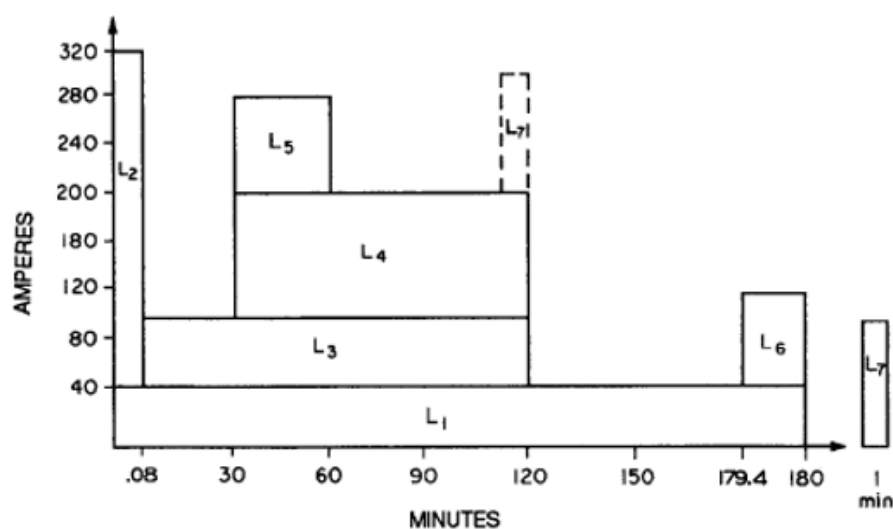


Figura 4.4: Gráfico modelo de um perfil de consumo [3]

Como é possível observar, o ciclo de trabalho da subestação em análise tem uma duração de 180 minutos e possui sete cargas distintas.

A carga L_1 é a única carga contínua, dado que permanece constante em todo o intervalo de tempo de funcionamento. As cargas L_2 e L_7 têm uma duração de 1 minuto, logo são cargas momentâneas, e ao contrário do que é recomendável, não são consideradas no último minuto de operação. As restantes cargas, L_3 , L_4 , L_5 e L_6 são descontínuas.

Em suma, a partir da construção do perfil de consumo é possível seguir para a fase seguinte, onde serão utilizados os dados inseridos pelo utilizador.

4.3 Dimensionamento de um Sistema de Baterias

O processo de dimensionamento de um sistema de baterias consiste em realizar um perfil de descarga para o sistema de baterias selecionado, considerando as necessidades da instalação, com o objetivo de assegurar a continuidade de serviço da subestação em caso de falha de alimentação. Por sua vez, um perfil de descarga é representado através de uma tabela que tem por base diversas variáveis que vão ser definidas e calculadas através da metodologia proposta.

Neste sentido, desenvolveu-se um algoritmo que analisa todos os cenários possíveis de falha, uma vez que a duração da falha da alimentação é desconhecida.

Este algoritmo vai realizar uma série de cálculos e deduções e, por isso, nas próximas secções serão abordadas as diferentes variáveis utilizadas no cálculo da capacidade final necessária para o sistema de baterias. Os métodos de cálculo em determinados aspetos vão ser diferentes para as duas tipologias de baterias consideradas: chumbo-ácido e níquel-cádmio.

Na figura 4.5 é apresentado o algoritmo desenvolvido nesta fase do processo:

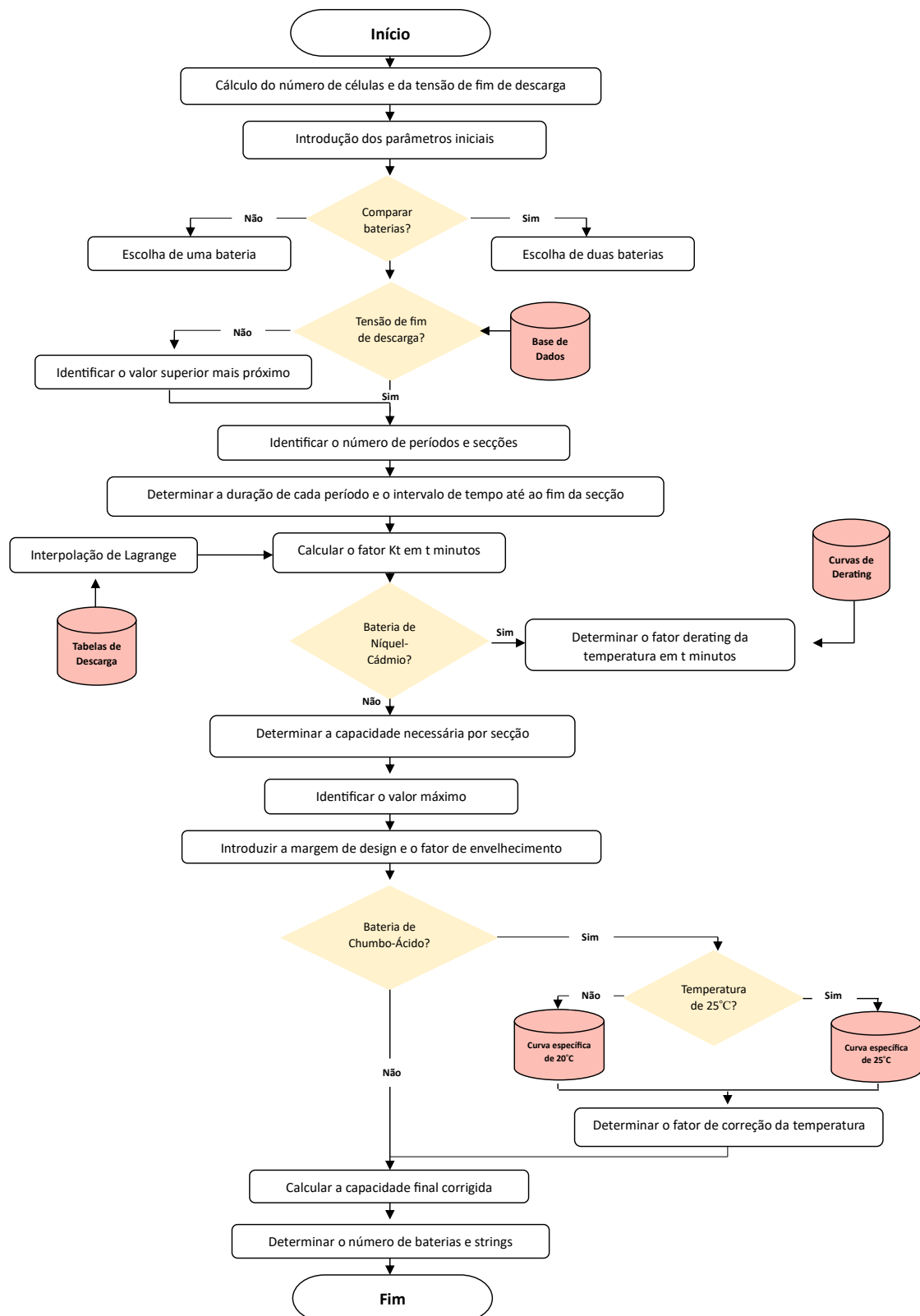


Figura 4.5: Algoritmo do dimensionamento de um sistema de baterias

4.3.1 Dados de Entrada e Parâmetros Característicos

O algoritmo recebe como entrada as características da instalação e do sistema de baterias a ser dimensionado.

Na tabela 4.1 encontram-se os dados de entrada que o utilizador terá de definir.

Tabela 4.1: Dados de Entrada do Sistema

Dados de entrada	Símbolo	Unidade
Tensão Nominal do Sistema	V_n	V
Tensão Máxima do Sistema	$V_{m\acute{a}x}$	V
Tensão Mínima do Sistema	V_{min}	V
Tensão da Célula	V_{cell}	V/célula
Temperatura Mínima da Instalação	T	°C

A partir da tensão máxima do sistema e da tensão especificada pelo utilizador para a célula é possível calcular o número de células necessário para satisfazer a tensão especificada.

$$N_{células} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{V_{célula}} \quad (4.1)$$

Dado que o número de células tem de ser um número inteiro, é feito um arredondamento por excesso do valor obtido na equação 4.1.

Outro parâmetro necessário é a tensão de fim de descarga (EODV - *End of Discharge Voltage*), que representa a tensão mínima admissível de cada célula.

$$EODV = \frac{V_{min}}{N_{células}} \quad (4.2)$$

É importante destacar que, embora seja possível obter o número de células e a tensão de fim de descarga a partir de valores já estabelecidos, o utilizador tem a possibilidade de inserir valores específicos nesses campos.

4.3.2 Períodos e Secções

Um perfil de consumo pode ser dividido em:

- **Períodos:** número de intervalos de tempos em que a carga se mantém constante;
- **Secções:** número de intervalos de tempo desde o instante inicial até ao final de cada período.

Na figura 4.6 encontra-se representado um gráfico que permite ilustrar a diferença entre período e secção. Os diferentes períodos estão representados a vermelho, P_1 , P_2 e P_3 e as secções

estão representadas a verde, S_1 , S_2 e S_3 . Estas duas variáveis possuem sempre o mesmo valor numérico.

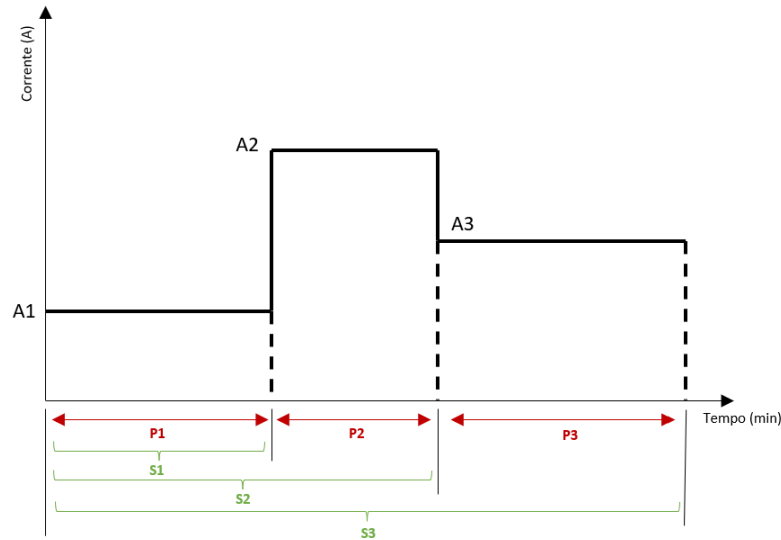


Figura 4.6: Exemplo ilustrativo - Período vs Secção

Esta divisão em períodos e secções é importante, pois como já foi referido, o algoritmo desenvolvido tem em consideração todos os cenários possíveis de falha, ou seja, tem em consideração todas as secções do perfil de consumo. Uma secção pode ser constituída por ou mais períodos associados a diferentes níveis de carga. O algoritmo para além de analisar a capacidade de corrente necessária para cada secção, realiza também uma análise mais detalhada dos seus períodos associados.

4.3.3 Carga e Variação de Carga

Seguidamente à identificação do número de períodos e secções é calculada a carga ativa em cada período e a variação de carga entre períodos consecutivos:

$$\Delta Carga_n = Carga_n - Carga_{n-1} \quad (4.3)$$

Para simplificar o processo de análise, determinadas secções não são consideradas, pois se a corrente necessário no período $P + 1$ for superior à corrente necessária no período P , significa que a secção S necessitará de uma capacidade menor de corrente, logo a análise a esta secção pode ser omitida e o algoritmo passa imediatamente para a secção $S + 1$.

A variação de carga é uma variável essencial neste processo, uma vez que vai determinar se a capacidade de corrente de um período será somado ou subtraído. Na próxima secção será ilustrado um exemplo para melhor entendimento.

4.3.4 Duração e Tempo para o Fim da Secção

Associado às variáveis de carga e variação de carga surgem duas variáveis temporais, duração e tempo para o fim da secção. A determinação da duração de cada período tem como finalidade auxiliar no cálculo do tempo para o fim da secção.

Apesar da metodologia realizar a análise por período é necessário considerar o funcionamento contínuo do sistema de baterias ao longo da secção.

Para melhor entendimento será apresentado um exemplo, analisando a secção S3 do perfil de consumo presente na figura 4.6.

No início de cada secção a metodologia começa por analisar o primeiro período, calcula a carga ativa, a variação de carga, que neste caso será igual à carga ativa, a duração e o tempo para o fim de secção. Esta última variável tem por base a consideração da permanência da primeira carga ao longo de toda a secção.

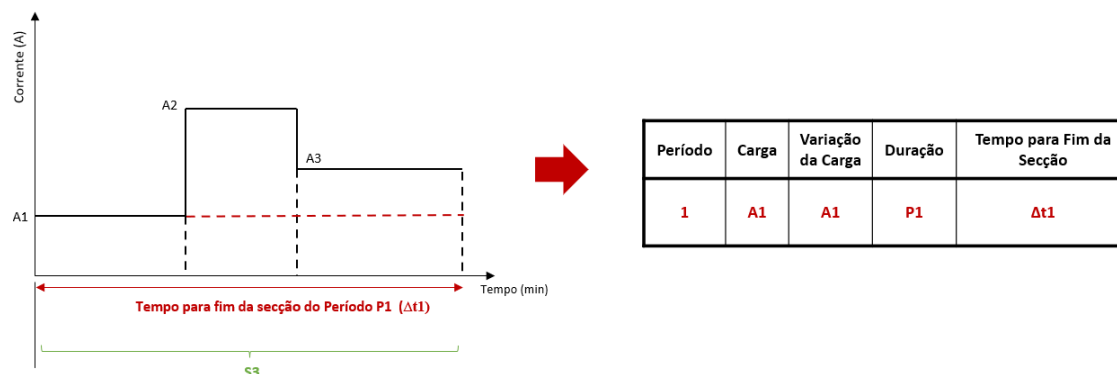


Figura 4.7: Tempo para o fim da secção do período 1

Tal como pode ser observado na figura 4.7 o tempo para o fim da secção da primeira carga corresponde à duração da secção, $\Delta t1$.

A fórmula do cálculo da capacidade por período integra o produto entre a variação de carga e o tempo para o fim da secção. Assim sendo, a capacidade calculada no primeiro período considera que a bateria tem de alimentar a carga A1 durante um intervalo de tempo, $\Delta t1$.

Na análise do período seguinte, o objetivo passa por determinar se é necessário aumentar a capacidade de corrente calculada no período 1, isto é, se a corrente no período 2 for superior à corrente no período 1, será necessário acrescentar a diferença de corrente. Contudo, o contrário pode acontecer, ou seja, a capacidade calculada no período 1 ser em excesso tendo em conta que a corrente necessária para o período 2 ser inferior à do período 1.

No período 2, o algoritmo volta a calcular as cargas ativas nesse período e a variação de carga, que neste caso vai corresponder à diferença de corrente entre o segundo e primeiro período. Tal como considerado no período anterior, volta-se a calcular o tempo para o fim da secção, que

corresponde à diferença entre Δt_1 e P_1 . O exemplo da análise do período 2 está apresentado na figura 4.8.

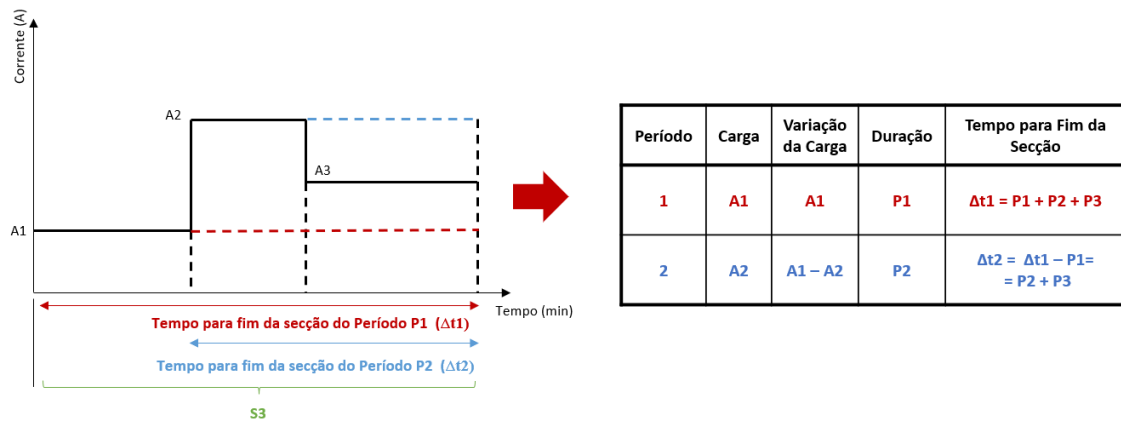


Figura 4.8: Tempo para o fim da secção do período 2

No terceiro e último período é feita a análise final, se é ainda necessário adicionar capacidade de corrente ou subtrair o excesso, figura 4.9.

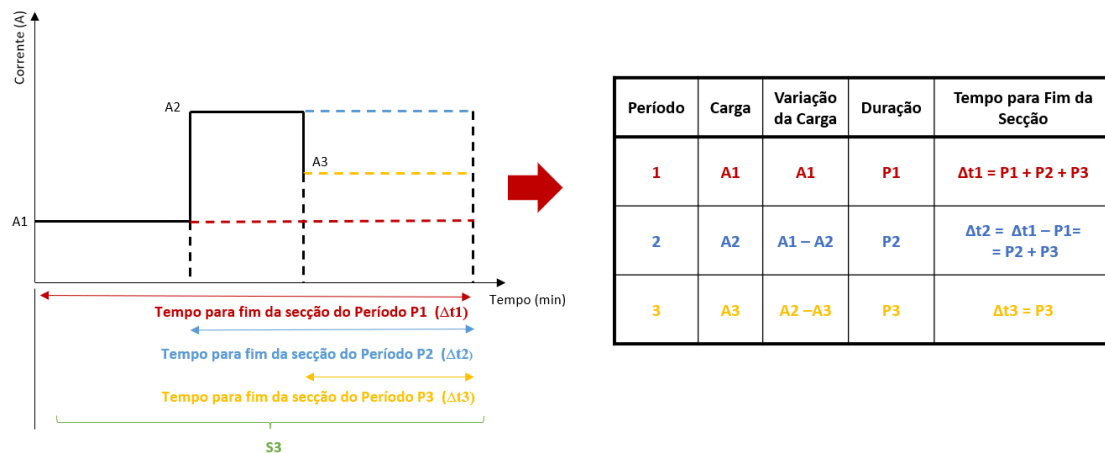


Figura 4.9: Tempo para o fim da secção do período 3

Resumindo, o sistema de baterias tem de ser capaz de alimentar a subestação durante o período de falha, e por esse motivo, a análise dos períodos é um processo em cadeia. Em primeiro lugar é analisado o primeiro período, considerando a continuidade da primeira carga, de seguida é avaliado o segundo período e a necessidade de aumento ou decréscimo da capacidade anteriormente calculada e assim sucessivamente. Deste modo, a metodologia desenvolvida tem em consideração todas as especificidades do sistema a dimensionar.

De notar, que este valor é apenas utilizado para determinar o fator de classificação da capacidade.

4.3.5 Fator de Classificação da Capacidade K_t

Um sistema de baterias sofre desgaste ao longo do seu funcionamento, o que se reflete numa diminuição da tensão e diminuição na capacidade de fornecimento de corrente. É, neste sentido que surge o fator de classificação da capacidade, K_t .

Tal como foi dito no final da secção anterior 4.3.4, este fator tem em consideração um determinado intervalo de tempo, e assim, a corrente que era necessária num dado período é aumentada de acordo com o tempo de funcionamento do sistema de baterias.

Este fator é obtido a partir da expressão 4.4:

$$K_t = \frac{\text{Capacidade nominal (Ah)}}{\text{Corrente de descarga (A)}} \quad (4.4)$$

A corrente de descarga corresponde à corrente máxima que a bateria é capaz de fornecer após um determinado intervalo de tempo para uma dada tensão.

Cada fabricante disponibiliza tabelas de descarga para diferentes tensões de descarga, sendo que os valores típicos utilizados para as tensões nas baterias de chumbo-ácido são os seguintes: 1.60 V, 1.65 V, 1.70 V, 1.75 V, 1.80 V, 1.85 V e 1.90 V. Em contrapartida, nas baterias de níquel-cádmio são consideradas as seguintes tensões: 1 V, 1.05 V, 1.1 V e 1.15 V.

Com base nestas tensões, são fornecidos os diferentes valores de corrente para tempos específicos de descarga, no entanto, cada fabricante opta por um determinado conjunto de tempos distintos. Acredita-se que estes valores sejam obtidos em ensaios não normalizados, sendo essa a razão pela qual cada fabricante opte por determinados valores de tempo.

Na tabela 4.2, apresenta-se um exemplo de uma tabela de descarga, nomeadamente do modelo DataSafe HX do fabricante EnerSys, para uma tensão de 1.70V.

Tabela 4.2: Exemplo de uma tabela de descarga - DataSafe HX - EnerSys [35]

End Voltage 1.70 VpC	Ampere Rating for Minutes to Specified End Voltage at 25.0°C														
Cell Model	1	15	30	45	60	120	180	240	300	360	420	480	600	720	1440
12HX25	53.73	12.36	6.959	4.983	3.889	2.090	1.450	1.118	0.914	0.774	0.672	0.594	0.480	0.404	0.210
12HX35	75.44	19.20	10.94	7.800	6.109	3.367	2.367	1.826	1.496	1.273	1.110	0.985	0.802	0.679	0.361
6HX50	115.6	29.08	16.75	11.90	9.261	5.004	3.493	2.703	2.215	1.881	1.637	1.450	1.175	0.991	0.521
12HX50	115.6	29.08	16.75	11.90	9.261	5.004	3.493	2.703	2.215	1.881	1.637	1.450	1.175	0.991	0.521
12HX80	136.3	43.24	24.45	17.37	13.61	7.579	5.362	4.140	3.400	2.898	2.533	2.253	1.850	1.572	0.835
12HX105	198.4	56.72	33.22	23.93	18.88	10.50	7.403	5.762	4.737	4.034	3.520	3.125	2.555	2.164	1.153
12HX100S	141.2	58.68	36.22	26.41	20.94	11.73	8.272	6.426	5.271	4.476	3.895	3.450	2.812	2.377	1.240
12HX135	224.6	72.83	42.69	30.81	24.26	13.51	9.507	7.353	6.014	5.096	4.426	3.914	3.186	2.686	1.384
12HX150	248.8	86.19	51.80	37.47	29.51	16.43	11.56	8.971	7.344	6.224	5.403	4.775	3.883	3.270	1.676
12HX205	376.1	110.3	62.30	44.03	34.40	18.75	12.80	9.896	8.132	6.929	6.050	5.375	4.404	3.736	1.967
12HX300	487.2	154.2	92.67	66.74	52.75	29.82	21.17	16.51	13.56	11.51	10.00	8.850	7.206	6.073	3.114
12HX330	562.1	183.1	108.7	78.26	61.68	34.79	24.69	19.26	15.82	13.43	11.67	10.33	8.407	7.085	3.633
12HX400	634.3	206.7	122.2	88.98	70.38	39.76	28.22	22.01	18.08	15.35	13.34	11.80	9.608	8.098	4.152
12HX505	659.9	275.5	160.3	114.3	89.58	49.48	34.98	26.95	22.19	18.99	16.66	14.88	12.30	10.51	5.687
12HX540	711.3	293.8	174.4	124.3	97.36	53.36	37.33	28.72	23.48	19.93	17.35	15.38	12.56	10.63	5.562

Como é possível verificar a partir da tabela ??, apenas alguns valores de tempo de descarga são conhecidos, e, por isso, foi necessário encontrar um método para determinar o valor do fator K_t para valores não tabelados.

Numa primeira tentativa, utilizou-se a interpolação de Lagrange, que tem por objetivo aproximar funções (tabeladas ou dadas por equações) por polinômios, permitindo facilitar a interpolação de pontos não tabelados.

Considerando a função $f(x)$, definida num intervalo $[a, b]$, contendo $(n + 1)$ pontos distintos: $x_0, x_1, \dots, x_n$ e $y_i = f(x_i)$, em que $i = 0, 1, \dots, n$. Representa-se o polinômio de grau $\leq n$ que interpola $f(x)$ em $x_0, x_1, \dots, x_n$ da seguinte forma:

$$P_n(x) = y_0 \times L_0(x) + y_1 \times L_1(x) + \dots + y_n \times L_n(x) \quad (4.5)$$

Onde os polinômios $L_k(x)$ são de grau n e definidos como:

$$L_k(x) = \frac{(x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{k-1})(x - x_{k+1}) \dots (x - x_n)}{(x_k - x_0)(x_k - x_1) \dots (x_k - x_{k-1})(x_k - x_{k+1}) \dots (x_k - x_n)} \quad (4.6)$$

$$L_k(x_i) = \begin{cases} 0 & \text{se } k \neq i \\ 1 & \text{se } k = i \end{cases} \quad (4.7)$$

Em suma, o polinômio de Lagrange pode ser descrito da seguinte forma:

$$P_n(x) = \sum_{k=0}^n y_k L_k(x) = \sum_{k=0}^n y_k \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \frac{(x - x_j)}{(x_k - x_j)} \quad (4.8)$$

Com base neste método, foi desenvolvida uma função em VBA, denominada "*InterpolateLagrange*", que permite calcular o fator de classificação da capacidade (valor de saída) a partir da bateria selecionada e o tempo de descarga (valor de entrada) - figura 4.10.

```

Function InterpolateLagrange(x)

    Set aux = ThisWorkbook.Sheets("Calculation_Kt")
    Set ws = ThisWorkbook.Sheets("Sizing")

    'Número de tempos de descarga
    valor = aux.Range("K3").value

    'Identificar a última linha com valores
    ultimaCelula = 6 + valor

    Set rngX = aux.Range("G7:G" & ultimaCelula) 'Valores de x -> tempos de descarga
    Set rngY = aux.Range("H7:H" & ultimaCelula) 'Valores de y -> fator Kt

    'cálculo do polinómio interpolador
    Resultado = 0
    For i = 0 To valor - 1
        temp = rngY(i + 1)
        For j = 0 To valor - 1
            If i <> j Then
                temp = temp * (x - rngX(j + 1)) / (rngX(i + 1) - rngX(j + 1))
            End If
        Next j
        Resultado = Resultado + temp
    Next i

    InterpolateLagrange = Resultado
End Function

```

Figura 4.10: Código desenvolvido em VBA para o cálculo do fator K_t

Após realizar simulações ao algoritmo, verificou-se que em alguns casos ocorria extrapolação dos valores. Existem diferentes razões que podem levar a este tipo de erro:

- **Elevado número de pontos:** exige maior esforço computacional e pode resultar em erros de arredondamento ou imprecisões numéricas;
- **Distribuição não uniforme dos pontos:** a interpolação de Lagrange consiste num método de estimativa baseado num conjunto limitado de pontos conhecidos, se os pontos não estiverem distribuídos uniformemente, a interpolação pode introduzir erros por estes estarem muito juntos ou muito separados.

Para comprovar o que foi referido anteriormente será apresentado um exemplo onde ocorre extrapolação utilizando Interpolação de Lagrange. Foi selecionada a bateria DataSafe 12HX540 para demonstrar o cálculo. A capacidade nominal desta bateria é 540 Ah e foram utilizados os valores de corrente presentes na tabela ??, para uma tensão de 1,70 V.

A partir da equação 4.4 foram calculados os vários valores do fator K_t .

Tabela 4.3: Valores do fator K_t - Bateria DataSafe 12HX540

DataSafe 12HX540		
Tempos (min)	Corrente (A)	K_t
1	711.30	0.76
15	293.80	1.84
30	174.40	3.10
45	124.30	4.34
60	97.36	5.55
120	53.36	10.12
180	37.33	14.47
240	28.72	18.80
300	23.48	23.00
360	19.93	27.10
420	17.35	31.12
480	15.38	35.11
600	12.56	42.99
720	10.63	50.80
1440	5.56	97.12

A metodologia inicialmente concebida, a partir dos valores de K_t , consegue calcular o fator de classificação de capacidade para qualquer valor de tempo de descarga.

Para um tempo de descarga de 599 minutos, a partir do código desenvolvido, figura 4.10, foi obtido um fator de 44,40. Observando novamente a tabela 4.3, verifica-se que o fator para um tempo de descarga de 600 minutos é aproximadamente 42,99. Sabendo que o fator de classificação aumenta com o tempo de descarga, seria de esperar que o valor deste fator para um tempo de descarga de 599 minutos fosse aproximadamente igual ao valor obtido para um tempo de 600 minutos, ou ligeiramente inferior.

Posto isto, não se considerou viável utilizar este método de aproximação, e optou-se por encontrar uma função polinomial aproximada à curva do fator K_t . Analisando algumas curvas características deste fator, concluiu-se que os pontos seguiam uma função aproximadamente quadrática.

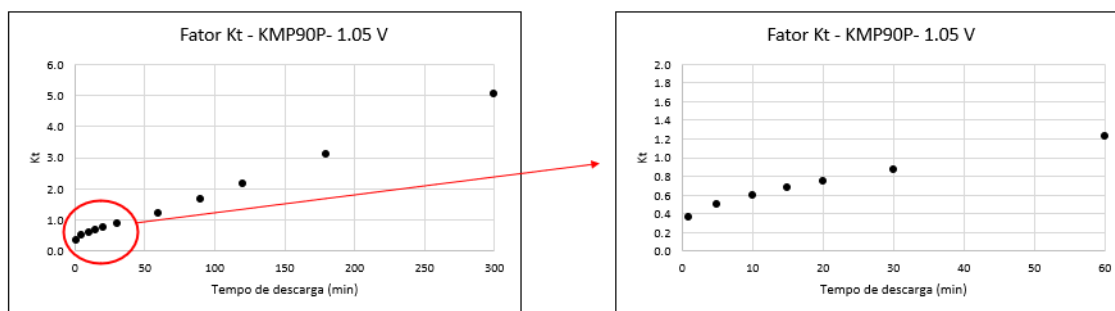


Figura 4.11: Exemplo da curva do fator K_t para as bateria KPM90P

Resumindo, nesta fase a metodologia começa por identificar a bateria e a tensão mínima por célula, de seguida recorrerá à base de dados para exportar o conjunto de tempos e correntes de descarga. A partir desses valores torna-se possível calcular os diferentes K_t , que vão ser esboçados num gráficos para posterior determinação da equação característica.

No perfil de descarga, o algoritmo utiliza a equação obtida e através do tempo de descarga calcula o respetivo fator de classificação da capacidade.

4.3.6 Fator *Derating* da Temperatura, T_t

A temperatura ambiente tem um impacto na capacidade disponível de uma bateria, sendo que as duas tipologias de baterias reagem de forma diferente à variação da temperatura.

O fator *derating* da temperatura é exclusivamente aplicado nas baterias de níquel-cádmio, e nas baterias de chumbo-ácido é aplicado outro fator, explicado na secção 4.3.10.

Este fator, tal como o nome indica, é um fator associado à temperatura, mas não só, depende também do tempo de descarga, devido às propriedades químicas das baterias de níquel-cádmio

Este fator é particular para cada tipologia de bateria de níquel-cádmio e é disponibilizado para diferentes tempos de descarga e temperaturas. Contudo, estas informações não são publicamente acessíveis, sendo exclusivamente fornecidas pelos fabricantes.

A norma IEEE-1115-2014 apresenta um conjunto de curvas típicas do fator *derating* da temperatura, que está disponível na figura 4.12..

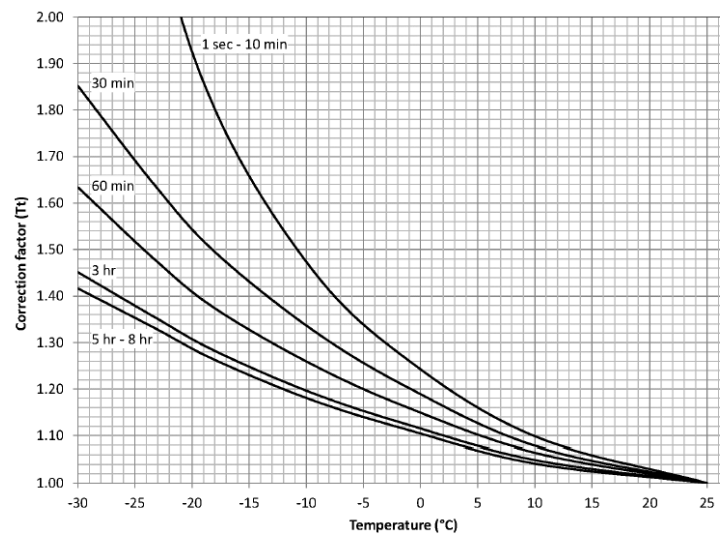


Figura 4.12: Curvas típicas do fator *derating* da temperatura [4]

Considerando a falta de acesso aos fatores *derating* da temperatura para as diferentes baterias de níquel-cádmio, foram utilizadas estas curvas como referência. Visto que os valores foram disponibilizados exclusivamente em formato gráfico, foram identificados pontos relevantes para construir as diferentes curvas e obter as equações características de cada uma. Os pontos extraídos dos gráficos encontram-se na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Pontos retirados das curvas tipo do fator *derating* de temperatura

Pontos retirados das curvas típicas do fator <i>derating</i> da temperatura - Norma IEEE - 1115-2014									
1 seg - 10 min		30 min		60 min		180 min		300 - 480 min	
T (°C)	Tt	T (°C)	Tt	T (°C)	Tt	T (°C)	Tt	T (°C)	Tt
25	1.00	25	1.00	25	1.00	25	1.00	25	1.00
15	1.06	15	1.05	15	1.04	15	1.03	15	1.02
10	1.10	10	1.08	10	1.06	10	1.05	10	1.04
5	1.16	5	1.13	5	1.10	5	1.08	5	1.07
0	1.24	0	1.19	0	1.15	0	1.12	0	1.10
-5	1.34	-5	1.26	-5	1.20	-5	1.15	-5	1.12
-10	1.47	-10	1.34	-10	1.26	-10	1.19	-10	1.18
-15	1.66	-15	1.43	-15	1.33	-15	1.25	-15	1.23
-20	1.92	-20	1.55	-20	1.41	-20	1.31	-20	1.29
-21	2.00	-25	1.69	-25	1.52	-25	1.38	-25	1.35
		-30	1.85	-30	1.63	-30	1.45	-30	1.42

Este fator contempla apenas temperaturas inferiores a 25°C, uma vez que a capacidade das baterias de níquel-cádmio é reduzida, o que implica a necessidade de considerar um fator de segurança por forma a aumentar a capacidade calculada.

Com auxílio da função "PROJ.LI" disponível no MS *Excel* foram obtidos os coeficientes da função que melhor se adapta ao conjunto de pontos, através do métodos do mínimos quadrados.

Dado o comportamento das diferentes curvas, foi realizado um estudo, que teve como objetivo identificar o grau da função polinomial que permitia uma melhor aproximação. Sabe-se que o aumento de grau proporciona uma aproximação mais precisa ao conjunto de pontos, no entanto, implica um aumento do esforço computacional devido ao maior número de coeficientes.

Na tabela 4.5 é apresentado o exemplo dos coeficientes obtidos para a curva para o tempo de descarga entre 1 segundo e 10 minutos, para os quatro graus considerados.

Tabela 4.5: Exemplo - Coeficientes para a curva de tempo de descarga entre 1 segundo e 10 minutos

Grau	Coeficientes da curva 1 segundo - 10 minutos					
	a ₅	a ₄	a ₃	a ₂	a ₁	a ₀
2	---	---	---	5.66E-04	-2.23E-02	1.24
3	---	---	-1.24E-05	6.32E-04	-1.73E-02	1.23
4	---	3.21E-07	-1.46E-05	4.60E-04	-1.69E-02	1.24
5	-1.38E-08	4.08E-07	-5.74E-06	4.36E-04	-1.79E-02	1.24

Tendo sido obtidos os coeficientes, o próximo passo consistiu em calcular o fator T_t a partir das funções obtidas para valores conhecidos, e posteriormente, calculou-se o erro quadrático - tabela 4.6.

Tabela 4.6: Exemplo - Fatores e erros obtidos para a curva com tempo de descarga entre 1 segundo e 10 minutos

Temperaturas	Valor de T_t	$T_t - 2$ grau	$T_t - 3$ grau	$T_t - 4$ grau	$T_t - 5$ grau
15	1.06	1.030	1.069	1.055	1.060
10	1.10	1.070	1.106	1.104	1.101
0	1.24	1.237	1.228	1.238	1.239
-10	1.47	1.516	1.477	1.471	1.473
-20	1.92	1.909	1.927	1.928	1.926



Soma dos Erros Quadráticos

Grau	2	3	4	5
Soma EQ	4.064E-03	3.454E-04	1.023E-04	4.962E-05

Seguiu-se o mesmo procedimento para as restantes curvas e, no final, todos os erros foram somados para identificar qual a função polinomial com a melhor relação entre grau - erro.

Tabela 4.7: Erros Totais

Grau	2	3	4	5
Soma Total EQ	4.584E-03	6.366E-04	4.102E-04	3.124E-04

Tal como seria de esperar, a função com maior grau foi a que obteve um erro menor, no entanto dada a pequena diferença entre o erro total obtido na função de quarto e quinto grau, decidiu-se utilizar a de quarto grau.

Foram obtidas as seguintes expressões para as diferentes curvas:

1 seg – 10 min	→	$T_t(T) = 3.206E-07 \times T^4 - 1.459E-05 \times T^3 + 4.6E-04 \times T^2 - 0.0169 \times T + 1.238$
30 min	→	$T_t(T) = 4.302E-08 \times T^4 - 1.957E-06 \times T^3 + 2.2E-04 \times T^2 - 0.0125 \times T + 1.189$
60 min	→	$T_t(T) = 3.378E-08 \times T^4 - 1.072E-06 \times T^3 + 1.6E-04 \times T^2 - 0.0096 \times T + 1.146$
180 min	→	$T_t(T) = -5.179E-09 \times T^4 - 6.422E-07 \times T^3 + 1.2E-04 \times T^2 - 0.0071 \times T + 1.112$
300 – 480 min	→	$T_t(T) = -2.526E-08 \times T^4 - 4.487E-07 \times T^3 + 1.4E-04 \times T^2 - 0.0068 \times T + 1.095$

Figura 4.13: Expressões das curvas características do fatortab:4.6 da temperatura

De acordo com os tempos de descarga dos diferentes períodos, o algoritmo selecionará a expressão correspondente e, utilizando o valor da temperatura é calculado o T_t .

Haverá situações em que os valores de tempo de descarga não coincidirão com o tempo especificado pelas curvas, nesses casos, considera-se a curva com o tempo anterior, uma vez que para tempos de descarga mais curtos, o fator T_t assume valores mais elevados.

Na figura 4.14, apresenta-se o gráfico construído que engloba todas as curvas obtidas:

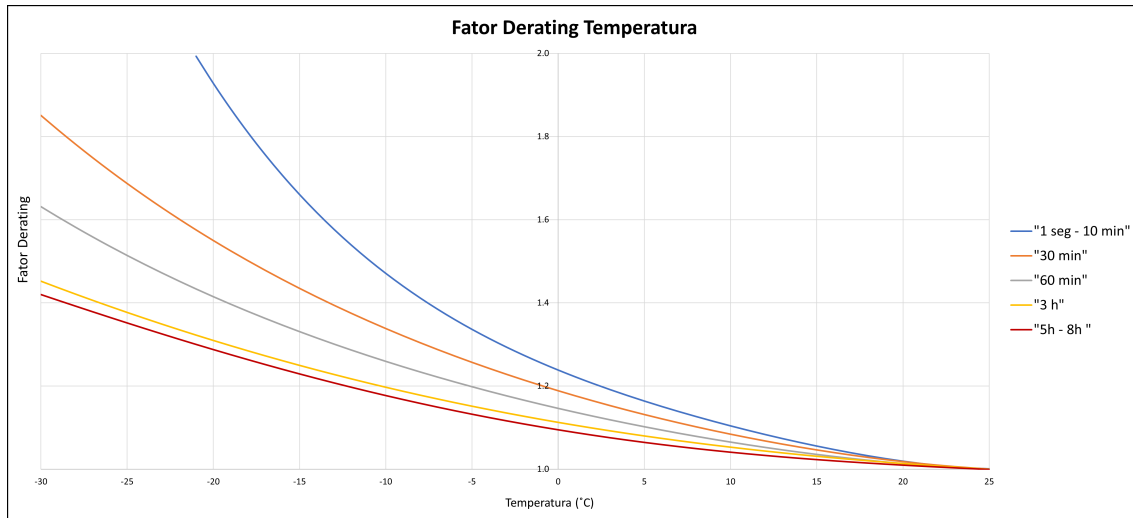


Figura 4.14: Curvas características do fator derating da temperatura

4.3.7 Capacidade Necessária por Secção

A capacidade, F_S , necessária para cada secção S , em que S assume valores entre 1 e N , para uma bateria de chumbo-ácido calcula-se a partir da seguinte expressão:

$$F_S = \sum_{P=1}^{P=S} [A_P - A_{(P-1)}] K_t \quad (4.9)$$

Onde:

- F_S : capacidade requisitada em cada secção S ;
- S : secção que está a ser analisada;
- P : período em análise;
- A_P : carga necessária para o período P ;
- t : tempo em minuto desde o início do período P até ao fim da secção S ;
- K_t : fator de classificação da capacidade.

Relativamente às baterias de níquel-cádmio, a capacidade tem em atenção outro fator, T_t :

$$F_S = \sum_{P=1}^{P=S} [A_P - A_{(P-1)}] K_t T_t \quad (4.10)$$

Em que, T_t corresponde ao fator *derating* da temperatura em t minutos.

Após o algoritmo calcular as capacidades de todas as secções, escolhe o maior valor:

$$\max_{s=1}^{s=N} F_s \quad (4.11)$$

Este valor não vai ser o final, uma vez que ainda há outros fatores a serem considerados e que apenas são aplicados ao valor final da capacidade.

4.3.8 Margem de Design

Em todos os projetos de dimensionamento, é fundamental considerar uma margem de design, e este não é exceção, pois podem surgir determinadas situações que podem alterar a capacidade calculada, como por exemplo manutenções inadequadas ou condições operacionais muito abaixo do ideal.

Assim, a margem de design é vista como um fator de segurança e normalmente varia entre 10% a 15% do valor calculado da capacidade.

O algoritmo permite, no entanto a livre escolha deste fator, uma vez que podem surgir casos em que o valor escolhido para a margem de design seja incomum.

4.3.9 Fator de Envelhecimento

Conforme mencionado anteriormente, a capacidade diminui progressivamente ao longo da sua vida útil, existindo alguns fatores que podem influenciar a taxa de diminuição da capacidade, sendo portanto, necessário considerar um fator de envelhecimento.

Tipicamente é utilizado um fator de envelhecimento de 1.25, isto é, a bateria é dimensionada para que a sua capacidade diminua para cerca de 80% da sua capacidade nominal durante a sua vida útil. Em aplicações sujeitas a altas temperaturas ou descargas profundas frequentes, é recomendável utilizar um fator maior, cerca de 1.43. Neste caso, a bateria deve ser substituída quando a sua capacidade diminui para aproximadamente 70% da sua capacidade nominal.

Tal como a margem de design, o utilizador tem livre escolha para o valor do fator de envelhecimento.

4.3.10 Fator de Correção de Temperatura

As baterias, sendo dispositivos eletroquímicos nos quais ocorrem reações de oxidação - redução reversíveis, durante a sua operação dependem da temperatura devido: cinética das reações do eletrodo e condutividade dos eletrólitos.

Assim, tal como foi referido na secção 4.3.6 as duas tipologias de baterias são influenciadas pela temperatura, mas de modo diferente. Enquanto que nas baterias de níquel-cádmio a influência

da temperatura surge associada ao tempo de descarga, nas baterias de chumbo-ácido, apenas é necessário considerar um fator de correção de temperatura após o cálculo da capacidade necessária.

Para temperaturas elevadas existe o favorecimento da cinética das reações de elétrodos e o transporte iônico no eletrólito, aumentando a capacidade da bateria. Por outro lado, a vida útil da bateria diminui, pois sendo a cinética mais rápida, também reações secundárias indesejáveis ocorrem mais rapidamente, fazendo com que a degradação seja mais rápida. A temperaturas baixas, ocorre o fenômeno inverso, a cinética e a condutividade do eletrólito é prejudicada.

Assim, para temperaturas mais elevadas o fator de correção da temperatura vai assumir valores inferiores a 1, e para temperaturas mais baixas, o fator vai ser superior a 1.

Na norma IEEE-485-2020 [3] são definidos os fatores de correção de temperatura para uma gravidade específica das células de 1.215, e para uma temperatura de referência de 25°C. Esta temperatura de referência corresponde à temperatura que as especificações da bateria são dadas, e assume o valor de 20°C ou 25°C.

Na tabela 4.8 apresentam-se os fatores de correção para uma temperatura de 25°C.

Tabela 4.8: Fatores de correção de temperatura para baterias de chumbo - ácido para uma temperatura de 25°C [3]

T(°C)	T (°F)	FC	T (°C)	T (°F)	FC
4.4	40	1.300	26.1	79	0.987
7.2	45	1.250	26.7	80	0.980
10.0	50	1.190	27.2	81	0.976
12.8	55	1.150	27.8	82	0.972
15.6	60	1.110	28.3	83	0.968
18.3	65	1.080	28.9	84	0.964
18.9	66	1.072	29.4	85	0.960
19.4	67	1.064	30.0	86	0.956
20.0	68	1.056	30.6	87	0.952
20.6	69	1.048	31.1	88	0.948
21.1	70	1.040	31.6	89	0.944
21.7	71	1.034	32.2	90	0.940
22.2	72	1.029	35.0	95	0.930
22.8	73	1.023	37.8	100	0.910
23.4	74	1.017	40.6	105	0.890
23.9	75	1.011	43.3	110	0.880
24.5	76	1.006	46.1	115	0.870
25.0	77	1.000	48.9	120	0.860
25.6	78	0.994			

A partir dos fatores fornecidos foi analisada a relação entre temperatura e o fator de correção, concluindo-se que a curva aproxima-se a uma regressão polinomial de segundo grau com a seguinte expressão:

$$FC(T)_{25^{\circ}\text{C}} = 0,000195 \times T^2 - 0,019926 \times T + 1,377120 \quad (4.12)$$

Em que:

- **FC:** fator de correção da temperatura a uma temperatura de referência de 25°C;
- **T:** temperatura em °C.

O gráfico traçado encontra-se na figura 4.15.

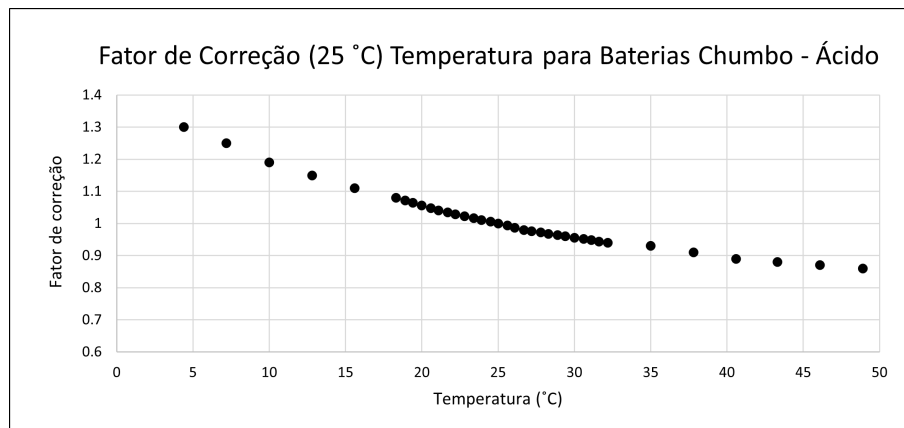


Figura 4.15: Fator de correção da temperatura em função da temperatura do eletrólito: baterias chumbo - ácido a 25°C

Embora a norma relativa às baterias de chumbo - ácido recomende uma temperatura de referência de 25°C, existem alguns fabricantes europeus que utilizam uma temperatura de referência de 20°C. Neste caso, os valores específicos dos fatores não são fornecidos, sendo necessário questionar diretamente os fabricantes.

Considerando o desconhecimento dos fatores, foi feita uma aproximação a partir dos fatores fornecidos para 25°C. De notar que o valor destes fatores estimados não correspondem aos reais, e que no caso de os clientes fornecerem o fator de correção, esse pode ser inserido na ferramenta.

A cada fator de correção de temperatura para 25°C, especificados na tabela 4.8 é multiplicado um fator:

$$FC_{20^{\circ}\text{C}} = FC(T)_{25^{\circ}\text{C}} \times \frac{FC(25^{\circ}\text{C})_{25^{\circ}\text{C}}}{FC(20^{\circ}\text{C})_{25^{\circ}\text{C}}} = FC(T)_{25^{\circ}\text{C}} \times \frac{1}{1,056} \quad (4.13)$$

Utilizando a equação 4.13 calculou-se todos os fatores de correção para as temperaturas especificadas na tabela 4.8, resultando nos valores presentes na seguinte tabela para uma temperatura de referência de 20°C:

Tabela 4.9: Fatores de correção de temperatura para baterias de chumbo - ácido para uma temperatura de 20°C

T(°C)	T (°F)	FC	T (°C)	T (°F)	FC
4.4	40	1.231	26.1	79	0.935
7.2	45	1.184	26.7	80	0.928
10.0	50	1.127	27.2	81	0.924
12.8	55	1.089	27.8	82	0.920
15.6	60	1.051	28.3	83	0.917
18.3	65	1.023	28.9	84	0.913
18.9	66	1.015	29.4	85	0.909
19.4	67	1.008	30.0	86	0.905
20.0	68	1.000	30.6	87	0.902
20.6	69	0.992	31.1	88	0.898
21.1	70	0.985	31.6	89	0.894
21.7	71	0.979	32.2	90	0.890
22.2	72	0.974	35.0	95	0.881
22.8	73	0.969	37.8	100	0.862
23.4	74	0.963	40.6	105	0.843
23.9	75	0.957	43.3	110	0.833
24.5	76	0.953	46.1	115	0.824
25.0	77	0.947	48.9	120	0.814
25.6	78	0.941			

Tal como foi feito anteriormente a partir dos valores obtidos para os fatores foi possível obter uma equação da curva característica:

$$FC(T)_{20^{\circ}\text{C}} = 0,000184 \times T^2 - 0,018870 \times T + 1,304091 \quad (4.14)$$

Nesta fase, o algoritmo identifica inicialmente a tipologia da bateria, caso seja de chumbo-ácido procede ao cálculo do fator de correção da temperatura. De seguida, percorre a base de dados para identificar a temperatura de referência, se esta for 25°C, o algoritmo utiliza a equação 4.12, caso seja 20°C, utiliza a equação 4.13.

4.3.11 Valor Corrigido da Capacidade

Ao finalizar a metodologia é efetuado o cálculo final, resultando no valor da capacidade necessária para alimentar a subestação:

$$\text{Capacidade Final} = \text{máx Fs} \times \text{MD} \times \text{FE} \times \text{FC} \quad (4.15)$$

Em que:

- **máx Fs:** valor máximo da capacidade;
- **MD:** margem de design;
- **FE:** fator de envelhecimento;
- **FC:** fator de correção da temperatura.

Nas baterias de níquel-cádmio é admitido um fator unitário no fator de correção da temperatura.

O sistema de baterias tem de respeitar duas condições: ser capaz de fornecer no mínimo a capacidade requisitada para os serviços auxiliares, e atender à tensão especificada para o sistema, dado que o sistema de baterias se encontra ligado em paralelo com as cargas.

Neste sentido, a metodologia permite identificar a configuração mínima do sistema de baterias, isto é, identifica o número necessário de strings em paralelo para respeitar a condição mínima da capacidade e o número de baterias por string em série, para corresponder à tensão especificada do sistema.

Como o sistema de baterias a dimensionar terá uma capacidade igual ou superior à requisitada pela subestação, haverá uma margem de segurança, que também será calculada pelo algoritmo.

4.4 Dimensionamento do Sistema de Carregamento

Após o restabelecimento do fornecimento de energia elétrica, espera-se que o sistema de baterias seja carregado, e, por essa razão, o último algoritmo desenvolvido, corresponde ao dimensionamento do sistema de carregamento para o sistema de baterias dimensionado.

Este algoritmo é executado após ter sido construído o perfil de consumo e após calculada a capacidade final.

O objetivo deste dimensionamento passa por calcular a corrente mínima que o sistema de baterias terá de ser capaz de fornecer ao sistema de baterias dimensionado, tendo em conta a capacidade de corrente requisitada para a alimentação da subestação.

Assim, o algoritmo baseia-se a realizar o seguinte cálculo:

$$C = \left(\frac{EF \times AH}{RT} + CL \right) \times DM \times AD \quad (4.16)$$

Em que:

- **C** - corrente de saída do carregador em Amperes;
- **EF** - fator de eficiência, o processo de carregar uma bateria não é um processo 100% eficaz, pois existem perdas. Assim, considerando essas perdas, é necessário considerar um fator de eficiência, que difere consoante o tipo de bateria:
 - Baterias Chumbo - Ácido: 1.15
 - Baterias Níquel - Cádmio: 1.40 [40]
- **AH**: capacidade de corrente requerida ao sistema de baterias (Ah);
- **RT**: tempo de recarga recomendado, expresso em horas;
- **CL**: carga contínua (A);
- **DM**: margem de design
- **AD**: fator de correção de altitude, para instalações localizadas a uma altitude inferior a 915 metros de altitude, o fator de correção de altitude assume o valor unitário. Para altitudes superiores considera-se um fator de cerca 6,7% por cada 915 metros [38].

Com o valor da corrente mínima de saída do sistema de carregamento, o utilizador pode assim, procurar no mercado carregadores que satisfaçam esta condição de corrente.

O algoritmo desta fase pode ser descrito na figura 4.16:

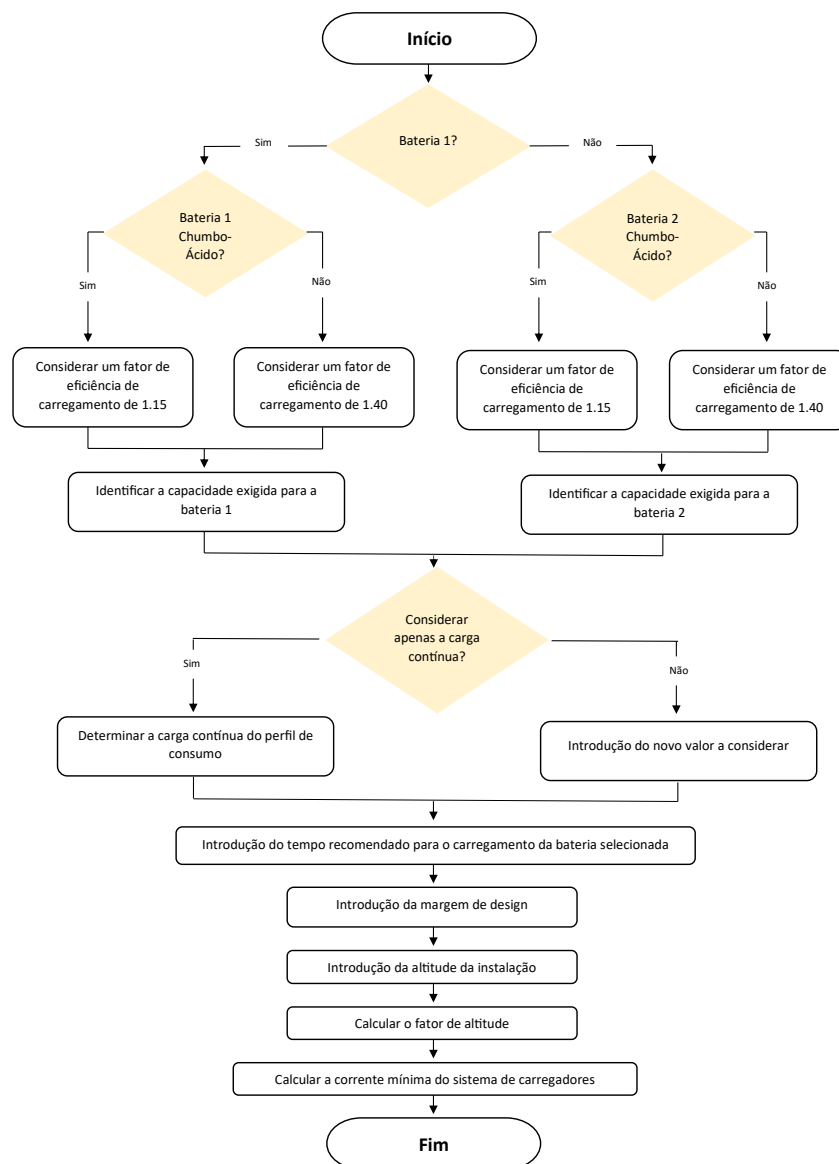


Figura 4.16: Algoritmo do dimensionamento do sistema de carregamento

4.5 Relatório

A última funcionalidade da ferramenta desenvolvida é a criação de dois relatórios em formato PDF, um relativo ao dimensionamento do sistema de baterias e outro para o dimensionamento do sistema de carregamento.

Este documento permite resumir os processos de dimensionamento, apresentando todos os valores e cálculos importantes, justificando-os sempre que possível. Assim, a análise torna-se mais simples e fácil.

Capítulo 5

Ferramenta Desenvolvida e Base de Dados

5.1 Introdução

Este capítulo tem como finalidade descrever a ferramenta computacional concebida, assim como a base de dados que suporta o algoritmo.

Conforme referido anteriormente, um dos principais objetivos desta ferramenta passa por automatizar o processo de dimensionamento de um sistema de baterias, no qual a informação das baterias está armazenada na base de dados. Utilizou-se mais que uma base de dados para facilitar o processo de cálculo, uma vez que existem aspetos diferenciadores entre as baterias.

Durante o desenvolvimento da ferramenta computacional, foram tidos em conta determinados aspetos com a finalidade de proporcionar aos utilizadores uma experiência agradável e atender de forma eficiente às suas necessidades:

- **Simplicidade de funcionamento** - a ferramenta computacional deve ser de fácil uso, com uma interface intuitiva e processos claros e diretos para os utilizadores;
- **Compatibilidade** - a ferramenta computacional deve ser capaz de ser executada em diferentes sistemas operacionais, tornando-a acessível em diferentes ambientes;
- **Design apelativo** - um aspeto gráfico apelativo promove uma fácil adaptação, incentivando a utilização da ferramenta;
- **Programa em código aberto** - o código deve permitir a integração de novos módulos, de modo a que este possa ser adaptado, mediante as necessidades dos utilizadores;
- **Modularidade** - um *software* modular e bem estruturados facilita a manutenção e atualização, permitindo adicionar novos recursos e corrigir erros com mais facilidade;

- **Eficiência no desempenho** - o *software* deve ser otimizado para oferecer uma boa performance, respondendo de forma rápida aos comandos dos utilizadores e executando as tarefas de forma eficiente;
- **Linguagem internacional** - decidiu-se que o programa seria implementado em inglês, dado ser uma língua universal.

5.2 Software

A parte algorítmica e de automatização da ferramenta foi implementada em *Visual Basic for Applications* (VBA). O sistema de entrada e saída de dados foi desenvolvido em *Microsoft Office Excel*, devido à sua versatilidade, flexibilidade e facilidade de implementação.

Para além das funcionalidades, a escolha destes *software*s teve em consideração a capacidade de serem executados em diferentes sistemas operacionais.



Figura 5.1: *Softwares* utilizados

5.3 Estrutura da Ferramenta

A estrutura da ferramenta foi concebida de forma a simplificar a visualização das informações e facilitar a execução das tarefas para o utilizador.

A ferramenta computacional é constituída por 14 folhas de cálculo, sendo que 5 dizem respeito a páginas principais: perfil de consumo, dimensionamento do sistema de baterias, dimensionamento do sistema de carregamento, relatório e base de dados. Estas páginas têm associado páginas secundárias que auxiliam no processo de cálculo e dedução de valores, estando acessíveis ao utilizador quando, além do cálculo, contêm informação relevante.

A estrutura da ferramenta computacional está resumida na figura [5.2](#).

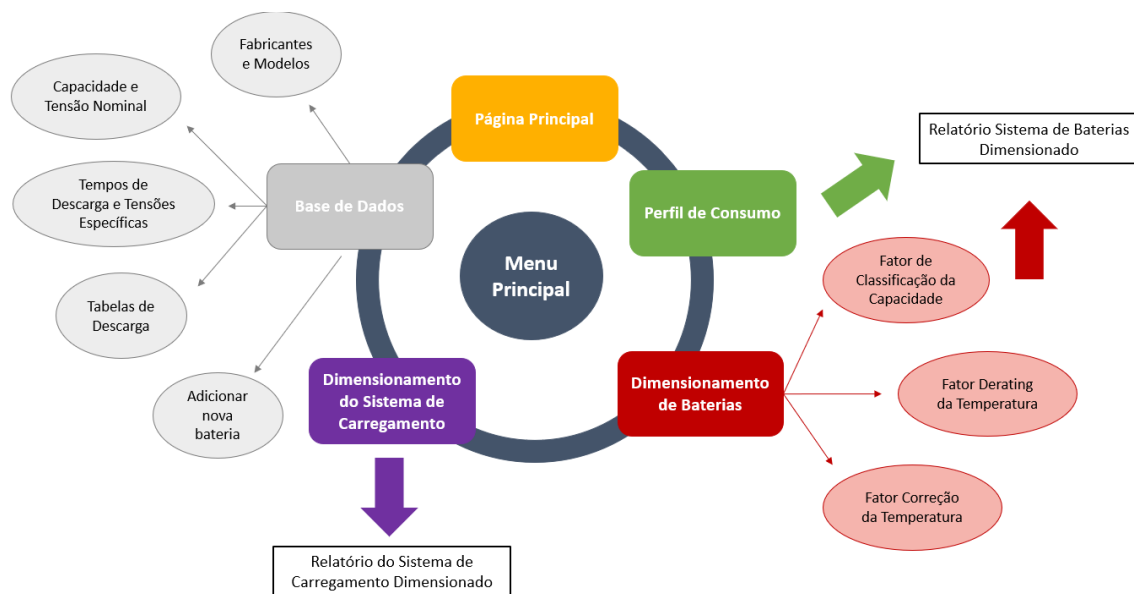


Figura 5.2: Estrutura da ferramenta computacional

O acesso às páginas principais é realizado através do menu lateral esquerdo, que permanece visível em todas as páginas de cálculo.

No menu encontram-se incluídas as 5 páginas principais e as respectivas páginas secundárias e, ao pressionar no nome de cada uma delas, o utilizador é redirecionado para a página correspondente.

As duas últimas opções dizem respeito à criação dos relatórios do dimensionamento do sistema de baterias e do sistema de carregamento, respetivamente. Os relatórios têm diversas finalidades, tais como:

- Apresentar a sequência de procedimentos;
- Apresentar os dados de entrada;
- Sintetizar os resultados obtidos;
- Apoiar na tomada de decisão;
- Comprovar a conformidade dos métodos utilizados com as normativas.

Na figura 5.3 está representado o menu da ferramenta computacional.

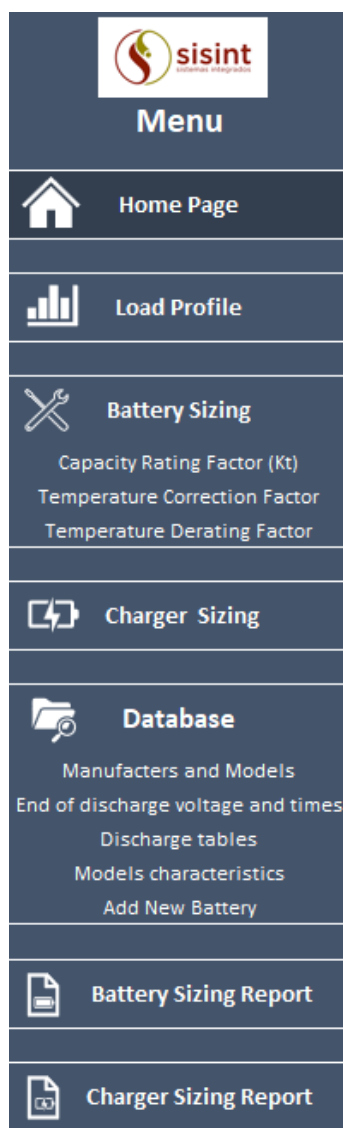


Figura 5.3: Menu da ferramenta computacional

5.4 Base de Dados

A criação da base de dados facilitou o acesso às características das baterias atualmente utilizadas pela SISINT. Inicialmente, não existia qualquer sistema de armazenamento de dados, havendo a necessidade de consultar os diferentes fabricantes e inserir manualmente as características das baterias em cada projeto.

Não foi possível criar uma única base de dados que abrangesse todos os valores necessários para o processo de cálculo, dado que existe uma ampla variedade de dados. Assim, foram criadas quatro bases de dados distintas para armazenar os nomes dos fabricantes, modelos e tipos de bateria,

os valores da capacidade e tensão nominal, tensões específicas de fim de descarga, tempos de descarga e correntes de descarga.

A ferramenta permite a adição de novos fabricantes e baterias à base de dados, garantindo a flexibilidade e atualização das características das baterias.

O primeiro passo para criar a base de dados foi identificar os fabricantes relevantes a serem incluídos, sendo eles: EnerSys, Fiamm, Hoppecke e Saft. Os logótipos destes fabricantes constam na figura 5.4.



Figura 5.4: Logótipos dos fabricantes das baterias

Após definidos os fabricantes, o próximo passo envolveu a pesquisa dos vários modelos existentes no mercado. Cada modelo tem associado diferentes tipos de baterias, onde a capacidade é o principal fator distintivo.

A base de dados atualmente inclui cerca de 996 tipos distintos de modelos de baterias.

Na figura 5.5, são apresentados os vários modelos presentes na base de dados e o número de tipos diferentes de baterias.

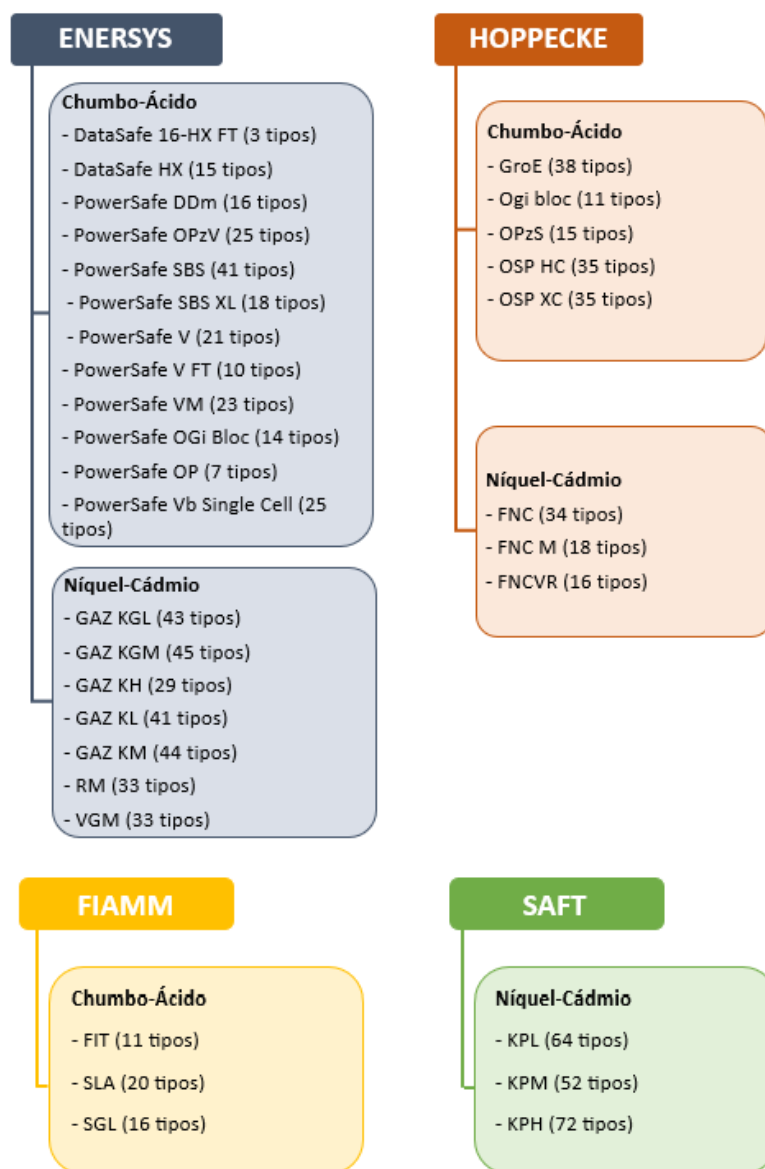


Figura 5.5: Modelos de baterias por fabricante

Para cada tipo de bateria foi então associada a tensão e a capacidade nominal, temperatura de referência dos valores fornecidos, tensões, tempos e correntes de descarga. Todas estas informações foram consultas nos manuais de cada modelo de bateria e inseridas manualmente na base de dados.

As bases de dados podem ser consultadas a qualquer altura pelo utilizador e os valores podem ser retificados ou atualizados.

Tal como já foi referido, a ferramenta permite a adição de novas baterias à base de dados, e para tal, basta clicar no menu em *"Add New Battery"* que redirecionará para a folha *"Add"* - figura 5.6.

New Battery

Manufacturer:

Chemistry:

Model:

Model Type:

Nominal Capacity (Ah):

Nominal Voltage (V):

Temperature (°C):

Voltages (V)	Times (min)

Figura 5.6: Adicionar nova bateria

Nesta página o utilizador tem de preencher os seguintes campos:

- Fabricante;
- Química (chumbo - ácido ou níquel - cádmio);
- Modelos;
- Tipo;
- Capacidade nominal;
- Tensão nominal;
- Temperatura de referência;
- Tabela de descarga.

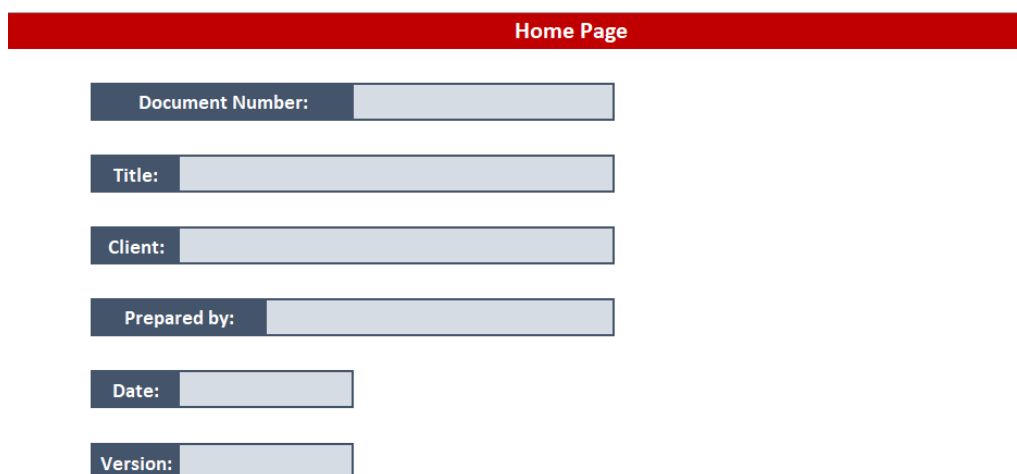
Depois de preencher todos os campos basta seleccionar o botão *"Add Battery"* e todas as informações da nova bateria serão adicionadas na base de dados. Para adicionar outra bateria, basta clicar no botão *"Delete"* e todos os campos serão apagados para serem novamente preenchidos.

5.4.1 Página Inicial

A página inicial, figura 5.7 é o ponto inicial da ferramenta, onde o utilizador identifica o projeto de dimensionamento e preenche os seguintes campos:

- Número de identificação do documento;
- Título do projeto;
- Cliente;
- Autor;
- Data;
- Versão.

Esta página tem apenas como objetivo identificar o projeto de dimensionamento.



The screenshot shows the 'Home Page' of the tool. It features a red header bar with the text 'Home Page'. Below the header, there is a form with six input fields, each preceded by a label in a dark blue box. The labels and their corresponding input fields are: 'Document Number:', 'Title:', 'Client:', 'Prepared by:', 'Date:', and 'Version:'.

Figura 5.7: Página Inicial da Ferramenta

5.5 Página do Perfil de Consumo

Após o utilizador identificar o projeto, deve dar início ao processo de dimensionamento acedendo à página do perfil de consumo. Para tal, basta clicar no nome "*Load Profile*" no menu - figura 5.8.

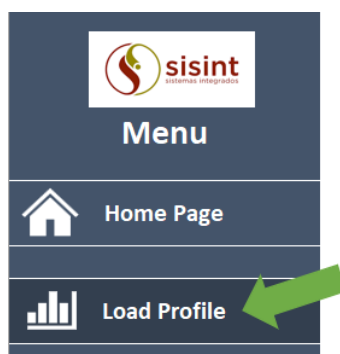


Figura 5.8: Acesso à página do perfil de consumo

Em primeiro lugar, o utilizador tem de especificar a quantidade de cargas permanentes, e tal como já foi referido na secção 4.2.1, este grupo de cargas contemplam as cargas contínuas e descontínuas.

Todos os campos obrigatórios encontram-se inicialmente preenchidos com a cor amarela, significando que o utilizador deve preencher campos necessários ao dimensionamento - figura 5.9.

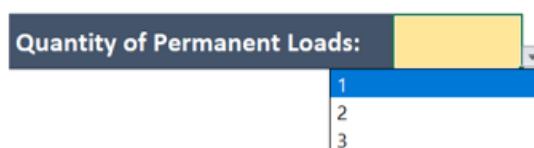


Figura 5.9: Quantidade de cargas permanentes

Entre os diversos exemplos de dimensionamento fornecidos pela empresa, a maioria apresentava uma única carga permanente, que incluía todos os equipamentos de alimentação contínua. Neste sentido, apenas se considerou necessário contemplar até 3 cargas permanentes.

Depois de estabelecida a quantidade de cargas permanente, é de responsabilidade do utilizador especificar e descrever as respetivas cargas: denominação da carga, a sua duração em minutos, o instante de início também em minutos e, por fim, a corrente em amperes. Na figura 5.10 encontra-se a tabela que o utilizador terá de preencher.

Permanent Loads			
Load Tag	Duration (min)	Begin (min)	Load (A)

Figura 5.10: Especificação das cargas permanentes

Do mesmo modo, será necessário especificar as cargas momentâneas, com a exceção de que estas cargas podem não existir no processo de dimensionamento - figura 5.11.

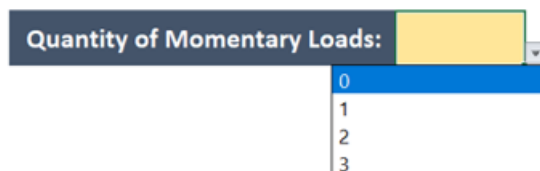


Figura 5.11: Quantidade de cargas permanentes

Tendo os valores de consumo de todos os equipamentos de corrente contínua da subestação, estes são processados a fim de construir o perfil de consumo. Para tal, basta o utilizador carregar no botão "Create Load Profile", representado na figura 5.12.



Figura 5.12: Botão "Create Load Profile"

5.6 Preenchimento dos Dados Iniciais do Sistema

Os campos de preenchimento dos dados iniciais do sistema estão disponíveis na folha de dimensionamento. Nesta página, surge em primeiro lugar a tabela com os campos referentes às especificações da instalação a amarelo:

Parameters	
Nominal System Voltage (Vdc):	
Minimum System Voltage (Vdc) :	
Maximum System Voltage (Vdc) :	
Cell Voltage (V/cell):	
Temperature (°C):	

Figura 5.13: Campos que o utilizador tem de preencher

O algoritmo implementado permite calcular automaticamente o número necessário de células, e a tensão de fim de descarga, sendo que o utilizador tem sempre a possibilidade inserir manualmente um valor específico nestes campos - figura 5.14.

Calculations: Number of Cells and EODV

Number of Cells (V_{max}/V_{cell}):

Cells

→

Cells

The number of cells must be a round number, without decimal places

EODV($V_{min}/Cells$):

V

Figura 5.14: Cálculo do número de células e da tensão de fim de descarga

No que diz respeito à escolha de bateria, existem dois botões, representados na figura 5.15. O botão *"Battery 1"*, situado à esquerda, permite visualizar os campos relativos à bateria 1 e o botão *"Battery 2"*, situado à direita, possibilita visualizar os campos da segunda bateria. A ferramenta permite calcular o perfil de descarga de uma ou duas baterias simultaneamente.



Figura 5.15: Botões *"Battery 1"* e *"Battery 2"*

Na escolha da bateria, o utilizador terá de seguir os seguintes passos:

1. Escolher o fabricante;
2. Selecionar se é uma bateria de chumbo - ácido ou níquel - cádmio;
3. Carregar no botão *"Model"* para atualizar e restringir as opções de modelo consoante o fabricante e a composição química da bateria;
4. Escolhe o modelo;
5. Carregar no botão *"Type"* para que a escolha do tipo de bateria seja mais fácil e rápida, apenas aparecerão os tipos de baterias referentes ao modelo escolhido;
6. Escolher o tipo de modelo;
7. Carregar no botão *"Capacity"* para realizar uma consulta na base de dados e obter a capacidade nominal da bateria selecionada.

Na figura figura 5.15 encontram-se exemplificados os passos a seguir.

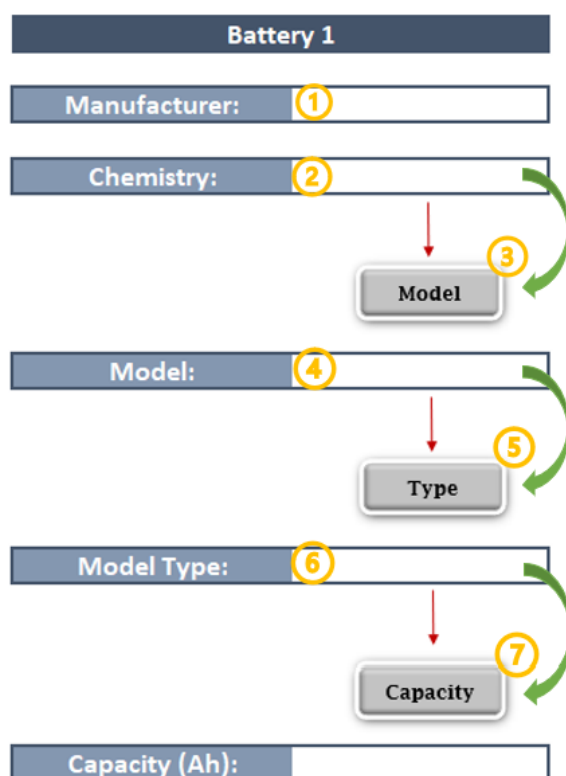


Figura 5.16: Passos para a escolha da bateria

Nos passos 1 e 2 as opções atuais disponíveis encontram-se representadas na figura 5.17.

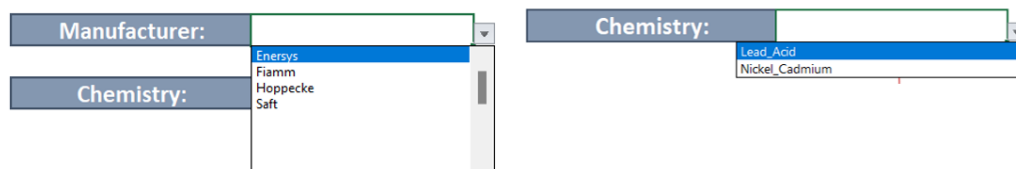


Figura 5.17: Opções disponíveis no campo "Fabricante" e "Química"

O botão denominado de "*Model*" permite restringir a escolha dos modelos disponíveis, tendo em conta o fabricante escolhido e a química da bateria, tal como o botão "*Type*", que permite mostrar ao utilizador apenas os tipos de baterias existentes do modelo escolhido. Por fim, o botão "*Capacity*" permite obter automaticamente a capacidade nominal da bateria escolhida.

Deverá ser adotado o mesmo método de seleção na segunda bateria.

5.7 Resultados

O perfil de descarga da(s) bateria(s) selecionada(s) surge após ter sido construído o perfil de consumo e preenchido os dados iniciais do sistema. O botão "*Size*" (figura 5.18) é responsável pela

determinação do perfil de descarga.



Figura 5.18: Botão "Size"

Logo após o clique no botão, o algoritmo vai validar a existência da tensão de fim de descarga, isto é, vai percorrer a base de dados e verificar se para a bateria escolhida existe uma tabela de descarga para a tensão mínima das células calculada.



Figura 5.19: Validação da tensão de fim de descarga

Caso o valor obtido corresponda exatamente a um valor especificado nas tabelas de descarga da bateria presente na base de dados, será apresentada a mensagem de validação presente na figura 5.20.

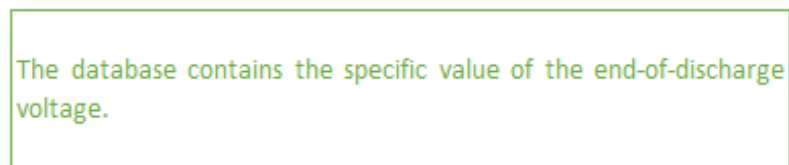


Figura 5.20: Mensagem de validação da existência da tensão de fim de descarga

No entanto, este valor pode não existir, e nesse caso será apresentada uma mensagem de aviso (figura 5.21), pois será utilizado outro valor de tensão. Ora, a tensão mínima das células é um fator de preocupação, uma vez que não deve admitir valores muito elevados, nem muito baixos, dado que pode comprometer o correto funcionamento da bateria. Em consequência, na inexistência do valor de tensão calculado é considerada a tensão imediatamente superior disponível na base de dados.

The database does not contain discharge tables for the specific value of the end-of-discharge voltage, so the next higher voltage value available will have to be used.

Figura 5.21: Mensagem de validação da inexistência da tensão de fim de descarga

Após a validação da tensão de fim de descarga, surge o perfil de descarga em forma de tabela e todos os campos são preenchidos automaticamente. O perfil de descarga da bateria 1 surge no lado esquerdo do ecrã, e caso exista uma segunda bateria, o perfil desta surge no lado direito da página.

As tabelas construídas vão depender da química da bateria a dimensionar, pois no caso de ser uma bateria de níquel-cádmio a tabela vai possuir mais uma coluna que as baterias de chumbo-ácido, devido à existência do fator *derating* da temperatura. Por sua vez, o número de linhas da tabela depende do número de secções do perfil de consumo, quanto maior número de secções tiver, maior será a tabela.

Na figura 5.22 estão representadas as tabelas típicas das duas tecnologias de bateria.

Baterias Chumbo - Ácido	Discharge Profile - Battery 1								
	1. Period	2. Load	3. Load Change	4. Duration	5. Time to End of Section	6. Kt t min	7. Required Section Size	+	-
Baterias Níquel - Cádmio	Discharge Profile - Battery 1								
	1. Period	2. Load	3. Load Change	4. Duration	5. Time to End of Section	6. Kt at t min	7. Tt at t min	8. Required Section Size	+
									-

Figura 5.22: Tabela do Perfil de Descarga

O algoritmo implementado é capaz de identificar o maior valor de capacidade obtido, denominando esse valor de "*Incorrected Size*", uma vez que ainda têm de ser considerados os fatores que permitem garantir segurança ao dimensionamento.

Apesar do cálculo e preenchimento automático de todos os campos anteriormente referidos, a ferramenta tem uma funcionalidade que permite ao utilizador alterar os valores do fator de classificação da capacidade e do fator derating da temperatura no caso de estes serem fornecidos pelo cliente e não corresponderem exatamente aos obtidos a partir do algoritmo implementado. Para esse efeito, e após ter sido obtido o perfil de descarga, o utilizador seleciona o botão "*Resize*", e de acordo com os novos valores inseridos, o cálculo da capacidade é refeito.

Uma vez obtido o valor máximo da capacidade de corrente necessária para o cenário mais desfavorável, o utilizador tem de preencher os campos relativos à margem de design e fator de envelhecimento. Optou-se por deixar um campo em vazio nestes fatores, uma vez que em determinados casos podem ser considerados valores incomuns, e, assim, a ferramenta permite qualquer valor - figura 5.23 .

	Battery 1	Battery 2
Incorrect Size		
Design Margin ₁		
Aging Factor ₂		
Temperature Correction Factor ₃		

Figura 5.23: Consideração de outros fatores de segurança

Juntamente com esta tabela é exibido um conjunto de notas, que permite auxiliar o utilizador na escolha de valores para este fatores, identificando os valores recomendados pelas normas. A nota 3 está associada ao fator de correção de temperatura e refere que no caso de se estar perante uma bateria de níquel-cádmio, este fator assume o valor unitário. No caso de ser uma bateria de chumbo-ácido este fator é calculado a partir das equações correspondentes (equação 4.12 ou 4.13).

Para ser obtido o valor final da capacidade requisitada para o sistema de baterias, basta selecionar o botão "*Correct Size*", representado na figura 5.28.



Figura 5.24: Botão "*Correct Size*"

Este botão para além de realizar o cálculo final da capacidade, permite também obter a configuração ideal do sistema de baterias para corresponder às necessidades da instalação em estudo, isto é, o número necessário de strings em paralelo para corresponder à capacidade de corrente requisitada e o número de baterias em série para atender à tensão especificada pelo utilizador.

Adicionalmente, é calculada a margem da configuração aconselhada, isto é, a percentagem da capacidade ainda restante da configuração ideal do sistema de baterias, perante a capacidade

exigida para a subestação - figura 5.25.

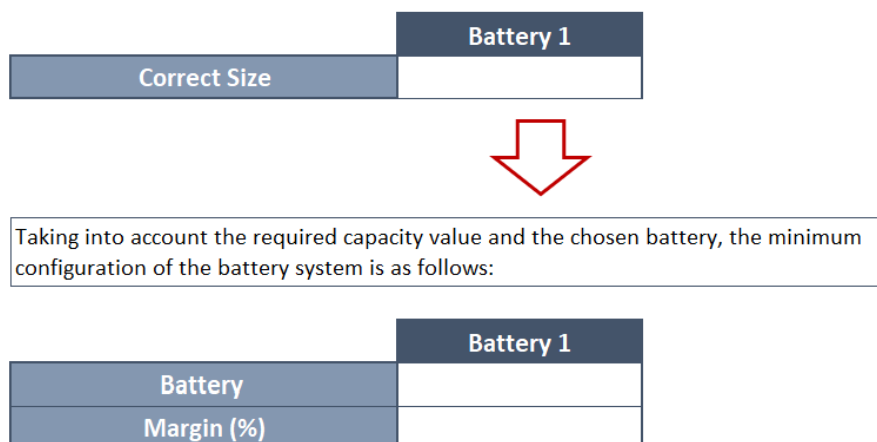


Figura 5.25: Configuração ideal do sistema de baterias

Apesar do cálculo do fator de correção da temperatura ser automático, é possível aceder à página "*Temperature Correction Factor*" (figura 5.26) para consultar os diferentes valores deste fator consoante a temperatura de referência, bem como os gráficos associados.

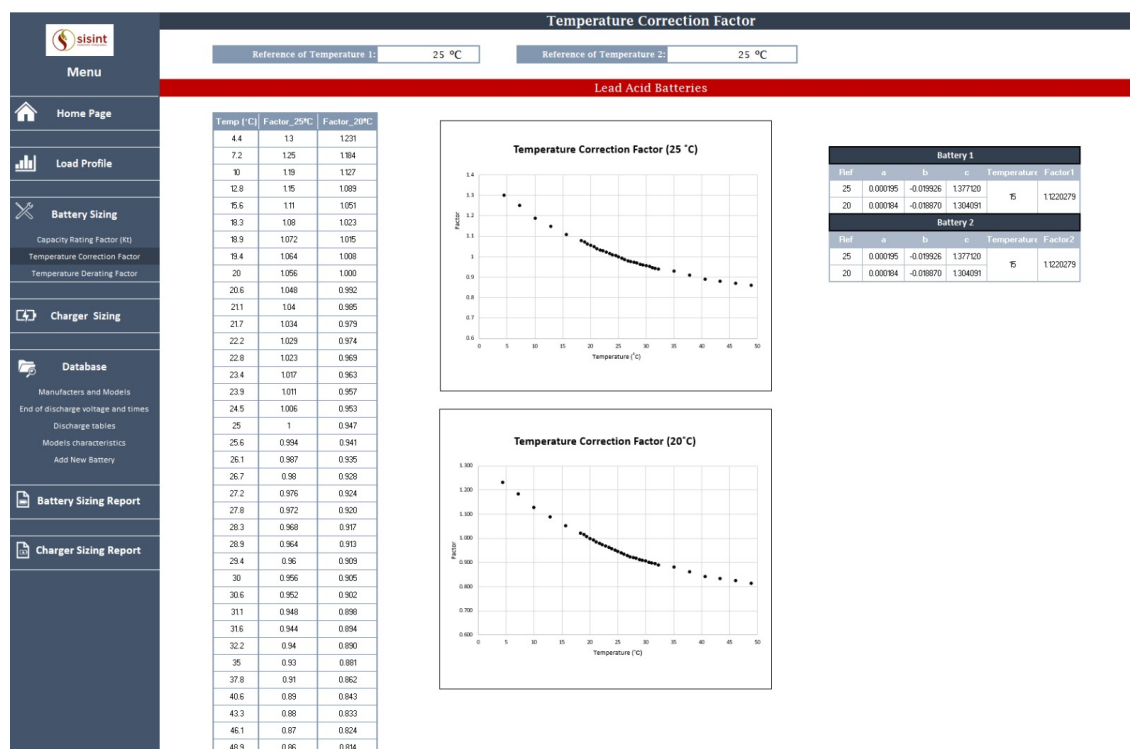


Figura 5.26: Página "*Temperature Correction Factor*"

Tal como o fator de correção da temperatura, existe uma página dedicada ao fator *derating* da temperatura, representada na figura 5.27.

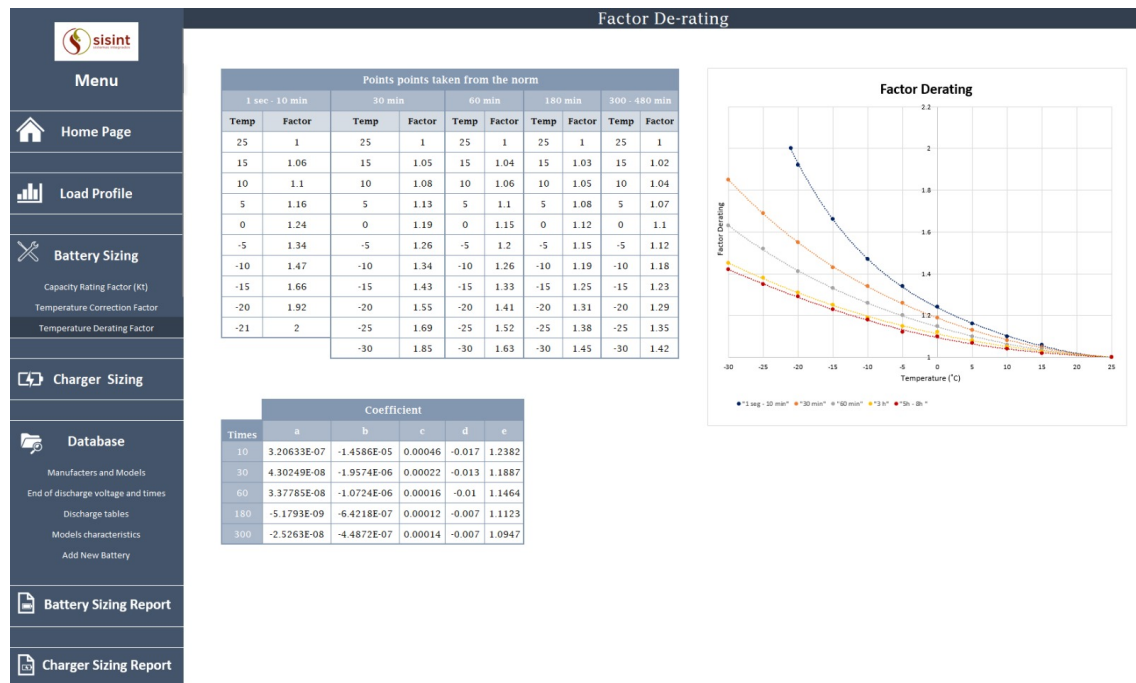


Figura 5.27: Página "Factor Derating"

O dimensionamento do sistema de carregamento encontra-se disponível na página "Charger Sizing" e, consiste em determinar a corrente mínima que o sistema de carregadores têm de ser capazes de fornecer ao sistema de baterias, perante a capacidade requisitada pela subestação.

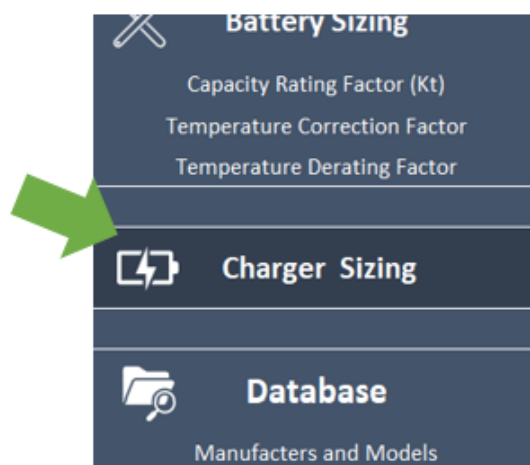


Figura 5.28: Acesso à página de dimensionamento do sistema de carregamento

Nesta página o utilizador terá de escolher qual bateria quer dimensionar, a 1 ou 2, sendo que por defeito está seleccionada bateria 1.

Para auxiliar o utilizado é apresentada a equação 4.16 que permite obter a corrente mínima do sistema de carregamento.

A primeira variável presente na equação é o fator de eficiência, que é automaticamente identificado a partir da tipologia da bateria dimensionada. Tal como esta variável, o valor da capacidade requisitada para a subestação é automaticamente determinado. Na figura 5.29 encontram-se representados os campos relativos às variáveis anteriormente referidas presentes na ferramenta.

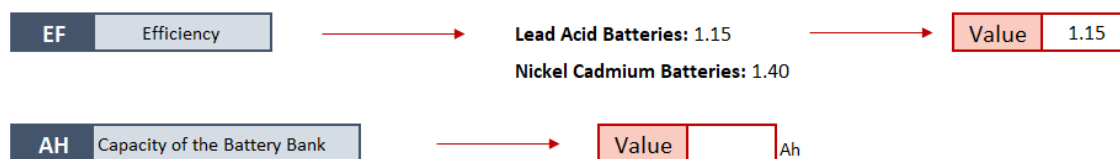


Figura 5.29: Identificação da eficiência de carregamento e da capacidade utilizada do sistema de baterias dimensionado

O algoritmo permite também, identificar a carga contínua, no entanto, o utilizador pode não querer utilizar exatamente este valor, optando por considerar um valor superior, dando alguma margem no dimensionamento. Assim sendo, o utilizador terá de responder (sim ou não), se quer considerar o valor da carga contínua. Se a resposta for afirmativa, na fórmula final será utilizado o valor identificado pelo algoritmo, caso a resposta seja negativa, o utilizador terá de especificar o novo valor - figura 5.30.

O diagrama mostra os campos de entrada para a carga contínua. No topo, um botão 'CL' com o rótulo 'Continuos Loads' aponta para um campo de entrada 'Value' seguido de 'A'. Abaixo, há duas perguntas com campos de resposta: 'Do you want to consider only continuous loads?' com opções 'Yes' e 'No', e 'If the answer is no, what load value to consider?' com um campo de entrada seguido de 'A'.

Figura 5.30: Campos relativos à carga contínua

Os campos relativos ao tempo de carregamento e à margem de design têm de ser preenchidos pelos utilizador.



Figura 5.31: Campos relativos ao tempo de carregamento e margem de design

O último fator a ter em consideração no cálculo da corrente mínima necessária é o fator de altitude. Para facilitar a determinação deste fator, o utilizador tem apenas de identificar a altura da subestação e o algoritmo determina automaticamente o valor do fator de altitude.

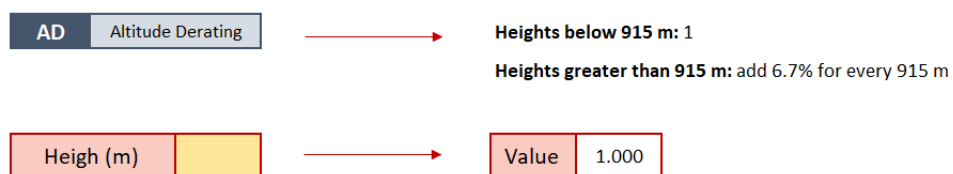


Figura 5.32: Campos relativos ao fator de altitude

No final, o algoritmo calcula o valor da corrente mínima em amperes.

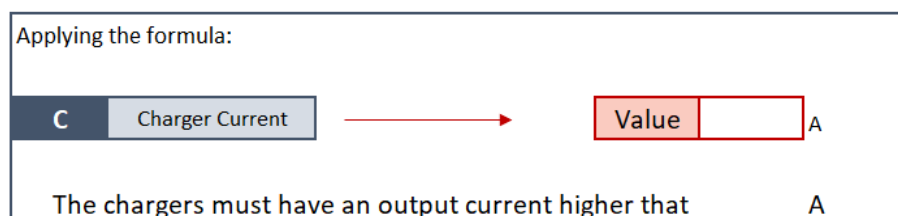


Figura 5.33: Apresentação da corrente mínima

Para exportar os relatórios dos dois dimensionamentos, basta carregar no menu nos nomes correspondentes e será criado um ficheiro PDF, como representado na figura 5.34.



Figura 5.34: Exportação dos relatórios do dimensionamento

Capítulo 6

Exemplos e Validação da Metodologia

No capítulo 4 foi apresentada a metodologia desenvolvida, que posteriormente foi incorporada numa ferramenta computacional, cujo funcionamento é detalhado no capítulo 5. Agora, importa comprovar que o algoritmo desenvolvido é robusto e eficiente, e pode ser utilizado no dimensionamento de sistemas de baterias para serviços auxiliares.

Assim, este capítulo apresenta de modo comparativo os resultados obtidos a partir da ferramenta computacional desenvolvida com outros projetos de dimensionamento. Procurou-se aplicar a ferramenta para as duas tecnologias de baterias consideradas e, desta forma, compreender se a metodologia vai de encontro ao que era expectável.

O primeiro caso de estudo vai abordar um projeto de dimensionamento de um sistema de baterias de chumbo-ácido para os serviços auxiliares de uma subestação, sendo que os resultados obtidos vão ser comparados com o projeto desenvolvido pela SISINT. Já o segundo caso, não se vai basear num projeto real, uma vez que o objetivo deste caso é comparar os resultados obtidos com um *software* desenvolvido pelo fabricante EnerSys.

Desta forma, a ferramenta desenvolvida não será apenas validada pela metodologia da empresa, mas também por um *software* de um fabricante. O processo de cálculo adotado pela empresa é conhecido, o que permite realizar uma comparação direta entre os valores e compreender as diferenças nestes. No entanto, o mesmo não acontece no *software* da EnerSys, ou seja, existem fatores aplicados que não estão disponíveis ao público em geral, pois devem resultar de estudos feitos pelos próprios. Consequentemente, a comparação não poderá ser tão direta como no primeiro caso.

6.1 Caso 1

O primeiro caso de estudo incide num dimensionamento de um sistema de baterias para serviços auxiliares da subestação A.

6.1.1 Resultados - Ferramenta Computacional

Começando por realizar o dimensionamento na ferramenta computacional, o primeiro passo consiste em identificar o projeto a desenvolver, tal como foi realizado na figura 6.1.

The screenshot shows the 'Home Page' of the SISINT software. On the left is a dark blue sidebar menu with the SISINT logo and icons for 'Home Page', 'Load Profile', and 'Battery Sizing'. The main area has a red header 'Home Page' and a form with the following fields:

- Document Number: 16062023
- Title: Subestação A
- Client: Validação da Metodologia
- Prepared by: Inês Santos
- Date: 16/06/2023
- Version: 1

Figura 6.1: Identificação do Projeto - Caso 1

De seguida, deve ser determinado o perfil de consumo da subestação em análise, em que os dados inseridos na ferramenta foram retirados do projeto realizado pela SISINT.

Na figura 6.2 apresenta-se a página correspondente à construção do gráfico do perfil de consumo, onde os números a vermelho representam a ordem pela qual devem ser realizadas as ações.

The screenshot shows the 'Load Profile' page. The sidebar menu has 'Load Profile' highlighted. The main area has a red header 'Load Profile' and contains the following elements:

- Quantity of Permanent Loads:** A red box with the number '1' is next to the input field containing '1'. A red box with the number '2' is next to the 'Permanent Loads' table.
- Permanent Loads Table:** A table with 4 columns: Load Tag, Duration (min), Begin (min), and Load (A). The first row is highlighted with a red box and the number '3':

Load Tag	Duration (min)	Begin (min)	Load (A)
A1	299	0	35.41
- Quantity of Momentary Loads:** A red box with the number '1' is next to the input field containing '1'. A red box with the number '4' is next to the 'Momentary Loads' table.
- Momentary Loads Table:** A table with 4 columns: Load Tag, Duration (sec), Instant of time (min), and Load (A). The first row is highlighted with a red box and the number '5':

Load Tag	Duration (sec)	Instant of time (min)	Load (A)
A2	60	299	125.45
- Create Load Profile:** A red box with the number '6' is next to the 'Create Load Profile' button.

Figura 6.2: Caracterização das cargas - Caso 1

A partir dos dados inseridos, conclui-se que a subestação possui uma carga permanente com uma duração de 299 minutos que requiere uma corrente de 35.41 A. Para além desta carga, possui também, uma carga momentânea, que corresponde à abertura dos disjuntores e ao disparo dos relés de proteção. Tal como é recomendado, esta carga surge no final do ciclo de trabalho da subestação e tem uma duração de um minuto. A corrente necessária para proceder às ações de proteção da subestação é de 125.45 A.

Ao pressionar o botão "Create Load Profile", os dados são processados dando origem ao gráfico do perfil de consumo, presente na figura 6.3.

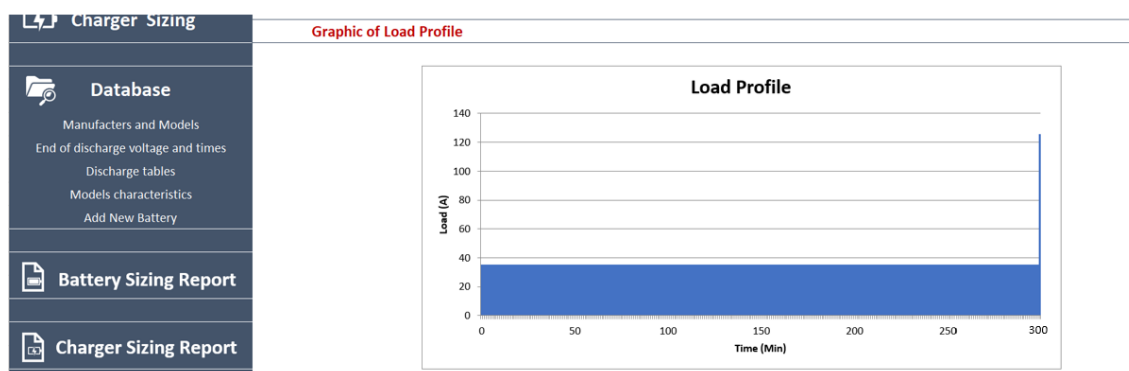


Figura 6.3: Perfil de Consumo - Caso 1

Como se pode observar na figura ??, o perfil de consumo em análise evidencia dois períodos, ou seja, possui duas secções. Como é referido na secção 4.3.3, o perfil de descarga não terá em consideração a primeira secção, uma vez que o segundo período exige uma corrente superior ao primeiro período.

Passando para a página destinada ao dimensionamento do sistema de baterias, esta recebe como entrada as características da instalação e do sistema de baterias a ser dimensionado. Assim, o utilizador terá de preencher os campos dentro da caixa destacada a vermelho, figura 6.4.

Parameters	
Nominal System Voltage (Vdc):	110
Minimum System Voltage (Vdc):	93.5
Maximum System Voltage (Vdc):	121
Cell Voltage (V/cell):	2.27
Temperature (°C):	20

Calculations: Number of Cells and EODV	
Number of Cells (Vmax/Vcell):	53.304 Cells
EODV(Vmin/Cells):	1.73 V

The number of cells must be a round number, without decimal places

54 Cells

Figura 6.4: Parâmetros iniciais e cálculo do número de célula e da tensão de fim de descarga - Caso 1

Destacado a verde, encontram-se os campos que são automaticamente calculados pela aplicação.

Normalmente, nos projetos de dimensionamento, os clientes indicam as baterias que devem ser utilizadas e, nesses casos o utilizador realiza diretamente o dimensionamento com as informações fornecidas. Contudo, podem existir projetos em que não é especificada a bateria a utilizar, concedendo à empresa a possibilidade de escolha da bateria. Nesses casos, a empresa opta por escolher

baterias que foram utilizadas em projetos anteriores, uma vez que já têm acesso às informações destas, facilitando o processo de dimensionamento.

Neste projeto de dimensionamento, o cliente indicou a bateria a ser utilizada - 12FIT180, que já consta na base de dados, não sendo necessário introduzir as suas características na ferramenta.

O preenchimento dos campos referente à escolha da bateria encontra-se detalhado na figura 6.5.

Figura 6.5: Bateria a utilizar - Caso 1

Ao pressionar o botão "Size" aparece de imediato a seguinte mensagem:

The database does not contain discharge tables for the specific value of the end-of-discharge voltage, so the next higher voltage value available will have to be used.

EODV - Battery 1 :

1.75

Figura 6.6: Validação da tensão de fim de descarga - Caso 1

Esta mensagem, diz respeito à validação da tensão mínima das células, calculada anteriormente e avisa que não existe a tabela de descarga para a bateria e tensão especificada (1.73 V/célula). Assim sendo, será utilizada a tabela de descarga para a tensão imediatamente superior 1.75 A.

Na figura 6.7, apresenta-se o perfil de descarga.

Discharge Profile									
Discharge Profile - Battery 1									
1. Period	2. Load	3. Load Change	4. Duration	5. Time to End of Section	6. Kt t min	7. Required Section Size	+	-	
If A2 greater than A1 proceed to Section 2									
1	A1								
							Subtotal 1		
Final									
1	A1	35.41	35.41	299.00	300.00	5.5993	198.27	198.27	0.00
2	A2	125.45	90.04	1.00	1.00	0.4585	41.28	41.28	0.00
							Subtotal 2		239.56

Figura 6.7: Perfil de descarga - Caso 1

Tal como foi inferido, este perfil de descarga apenas considera a segunda secção, e, por conseguinte, conclui-se imediatamente que a capacidade requisitada para esta secção corresponderá ao pior cenário. Este valor, por sua vez, não corresponde ao valor final, pois falta considerar os fatores de segurança. Na figura 6.8 estão representados os passos que o utilizador tem de realizar nesta fase do dimensionamento

Battery 1	
Incorrect Size	239.56
Design Margin ₁	1.10
Aging Factor ₂	1.25
Temperature Correction Factor ₃	1.00

1

2

Correct Size

Notes:

1 - According to what is indicated in standard, it is recommended to consider a factor between 1.10 and 1.15.

2 - According to what is indicated in standard, it is recommended to consider a factor between 1.10 and 1.30, but the usual factor is 1.25.

3 - If the sizing is for a nickel-cadmium battery, it is considered by default a temperature correction factor of 1. If it is for a lead-acid battery, the calculation is done automatically. However, the user can manually enter a value.

Figura 6.8: Fatores de Segurança - Caso 1

Em conformidade com o estabelecido na norma, este projeto define uma margem de design de 1.10 e um fator de envelhecimento de 1.25. Relativamente ao fator de correção da temperatura, o algoritmo é capaz de calcular este fator, tendo sido obtido um valor igual a 1. A temperatura mínima da instalação é cerca de 20°C e todas as informações e valores fornecidos para a bateria são dadas para uma temperatura de referência de 20°C, assim justifica-se o valor unitário do fator de correção da temperatura.

Carregando no botão assinalado com o número 2 na figura ??, obtém-se a capacidade que o sistema de baterias terá de possuir para ser capaz de alimentar todos os equipamentos de corrente contínua presentes na subestação. Consequentemente é obtida a configuração mínima do sistema de baterias, figura 6.9.

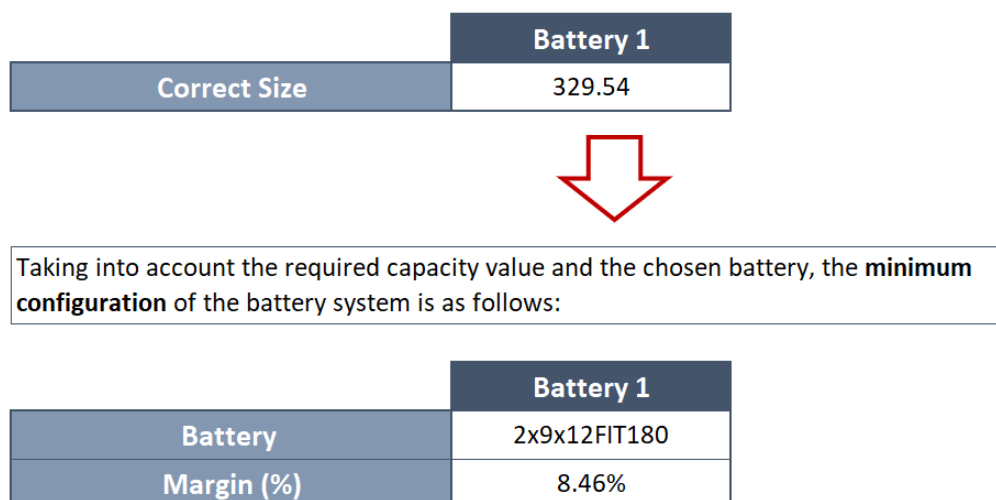


Figura 6.9: Configuração do Sistema de Baterias - Caso 1

Perante uma situação de falha elétrica, a subestação A requiere um sistema de baterias que seja capaz de fornecer 329.54 Ah, por forma a garantir a continuidade de serviço.

A configuração mínima deste sistema de baterias terá de ser 2x9x12FIT180, pois tal como o nome indica, esta bateria tem uma capacidade de 180 Ah, sendo necessário duas strings em paralelo, para atender à capacidade calculada. Este sistema de baterias, para além de ser capaz de alimentar todos os equipamentos de corrente contínua, tem de prefazer a tensão especificada para o sistema, dado que se encontra ligado em paralelo com as cargas. Assim sendo, dado que esta bateria possui 6 células, e, para atender ao número de células previamente calculado são necessárias 9 baterias ($6 \times 9 = 54$ células).

Esta configuração permite ter uma segurança no fornecimento de corrente, dado que para além da corrente que terá de fornecer aos serviços auxiliares da subestação, é ainda capaz de fornecer $0.0846 \times \text{Capacidade Nominal (Ah)}$.

A parte principal do projeto, encontra-se assim concluída, havendo a possibilidade de ainda dimensionar o sistema de carregamento para o sistema de baterias dimensionado.

Neste caso, foi apenas realizado o dimensionamento para uma bateria, mas no caso do dimensionamento ser realizado para duas baterias em simultâneo, ter-se-á de identificar o sistema de baterias para o qual se quer dimensionar o carregado, sendo que por defeito a metodologia seleciona a bateria 1.

O cálculo da corrente mínima necessária para alimentar o sistema de baterias dimensionado depende de diversas variáveis, em que algumas são calculadas automaticamente e, outras necessitam de ser especificadas pelo utilizador.

As duas primeiras variáveis (fator de eficiência e capacidade utilizada pelo sistema de baterias)

presentes na equação do cálculo mínimo da corrente (equação 4.16) são automaticamente calculadas, pois apenas dependem da tecnologia da bateria e da capacidade anteriormente calculada.

Charge Sizing

Which battery would you like to size its charger? 1

The capacity of the 110 VDC battery chargers shall be determined according to the following equation:

$$C = \left(\frac{EF \times AH}{RT} + CL \right) \times DM \times AD$$

Where:

EF Efficiency → Lead Acid Batteries: 1.15 → Value 1.15
 Nickel Cadmium Batteries: 1.40

AH Capacity of the Battery Bank → Value 329.54 Ah

CL Continuous Loads → Value 35.41 A

Figura 6.10: Início do Dimensionamento do Sistema de Baterias - Caso 1

A eficiência é, então calculada a partir da tecnologia de bateria, que neste caso é chumbo-ácido e, por isso, o fator de eficiência é 1.15. A capacidade que foi utilizada pelo sistema de baterias, corresponde ao valor previamente calculado 329.54 Ah.

A variável associada à carga contínua tal como as variáveis anteriormente referidas é automaticamente calculada a partir do perfil de consumo, mas possui uma particularidade. O utilizador pode optar por utilizar este valor, ou, por outras razões decidir utilizar outro valor, garantindo uma margem de segurança. Assim, o utilizador tem de responder (Sim ou Não) à questão "Quer considerar apenas o valor da carga contínua?". Neste caso, a resposta será "Sim".

Charger Sizing

Database

- Manufacturers and Models
- End of discharge voltage and times
- Discharge tables
- Models characteristics
- Add New Battery

Battery Sizing Report

Charger Sizing Report

Do you want to consider only continuous loads? Yes

If the answer is no, what load value to consider? A

RT (h) Recharge Time → Value 5 h

DM Design Margin → Value 1

AD Altitude Derating → Heights below 915 m: 1
 Heights greater than 915 m: add 6.7% for every 915 m

Heigh (m) 215 → Value 1.000

Figura 6.11: Preenchimento dos campos por parte do utilizador - Caso 1

O tempo de carregamento, a margem de design e a altitude da instalação são variáveis que têm de ser especificadas pelo utilizador.

O cálculo da corrente é realizado automaticamente, após todas as variáveis estarem definidas - figura 6.12.

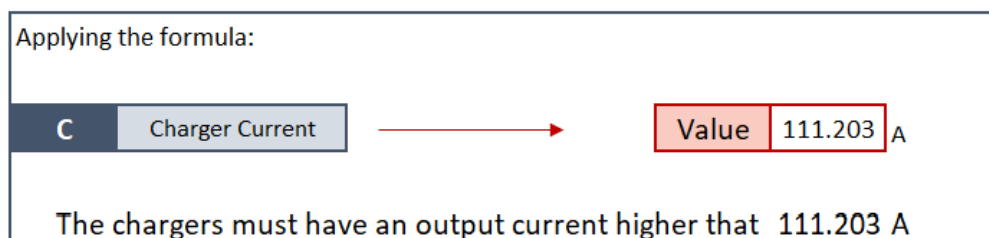


Figura 6.12: Corrente mínima - Caso 1

Este valor, permite ao utilizador procurar no mercado opções de sistemas de carregadores que satisfaçam a condição da corrente mínima.

A ferramenta computacional tem, ainda, a capacidade de criar relatórios dos dimensionamentos realizados. Os anexos deste projeto encontram-se no anexo A.

6.1.2 Comparação de Resultados

Com vista a validar a metodologia proposta, será feita uma comparação entre os resultados obtidos na secção anterior e os considerados no projeto de dimensionamento realizado pela SISINT.

A primeira fase do processo de dimensionamento (perfil de consumo) não difere, pois não depende de fatores externos, nem de cálculos intermédios. Porém, na segunda fase, o mesmo não acontece.

Na tabela 6.1, são apresentados os diversos valores obtidos no perfil de descarga dos dois métodos. Apenas são apresentados os valores que carecem de diferenças, uma vez que existem determinadas variáveis que são exatamente iguais, pois não dependem de métodos de aproximação nem de cálculos, sendo elas: carga, variação de carga, duração, tempo para fim da secção, margem de design e fator de envelhecimento.

Tabela 6.1: Comparação de resultados - Caso 1

Variáveis	Ferramenta Computacional	Projeto de Dimensionamento - SISINT
Kt - Período 1	5.599	5.590
Kt - Período 2	0.459	0.309
Capacidade Necessária - Período 1	198.27 Ah	197.94 Ah
Capacidade Necessária - Período 2	41.28 Ah	27.82 Ah
Subtotal	239.56 Ah	226.26 Ah
Fator de Correção da Temperatura	1.000	1.056
Capacidade Final	329.54 Ah	328.53 Ah

A primeira variável a analisar é o fator de classificação da capacidade, que assume um valor quase idêntico nos dois dimensionamentos no primeiro período, no entanto no segundo período existe um pequeno desvio entre os valores.

Esta discrepância de valores, deve-se ao facto da SISINT utilizar um grau diferente na aproximação à curva característica do fator K_t , pois opta por uma função polinomial de terceiro grau. Já a metodologia desenvolvida, utiliza uma função polinomial de segundo grau, uma vez que os resultados obtidos para tempos de descarga de curta duração são superiores, e para valores mais elevados, a diferença não é significativa. Assim sendo, valida-se o método de obtenção do fator de classificação da capacidade, dado que garante segurança no dimensionamento (pior cenário).

A diferença verificada na capacidade necessária no período 2, deve-se aos valores do fator K_t .

No que concerne ao fator de correção da temperatura existem algumas limitações, no sentido em que, na norma [3] apenas identifica os fatores para uma temperatura de referência 25°C, e por isso, a empresa considerou estes valores. Como referido na secção 4.3.10, com o decorrer do trabalho, foi identificado que existiam determinados fabricantes que não utilizavam uma temperatura de referência de 25°C, mas sim de 20°C. Este pormenor, impossibilita a utilização dos valores fornecidos na norma, pelo que a metodologia desenvolvida permite ultrapassar este constrangimento associado à temperatura, conseguindo realizar uma aproximação aos fatores de correção para uma temperatura de referência de 20°C.

Assim, face ao exposto, conclui-se que o valor correto para o fator de correção da temperatura é 1, pois as informações desta bateria são fornecidas para uma temperatura de referência de 20°C e a temperatura mínima da instalação das baterias é 20°C. Logo, valida-se o método de obtenção do fator de correção da temperatura para as baterias de chumbo-ácido.

Independentemente das disparidades identificadas, o resultado final é semelhante nos dois casos, levando à validação da metodologia desenvolvida para as baterias de chumbo-ácido.

No âmbito do cálculo da corrente necessária para o carregamento do sistema de baterias dimensionado, existem diferenças entre o método adotado na ferramenta e o adotado pela empresa.

A empresa utiliza a seguinte equação:

$$C = \left(\frac{AH}{RT} + CL \right) \times k_1 \times k_2 \quad (6.1)$$

Em que:

- **C**: corrente de saída do carregador;
- **AH**: capacidade utilizada pelo sistema de baterias;
- **RT**: tempo de recarga recomendado, expresso em horas;
- k_1 : fator de correção da temperatura;
- k_2 : fator de correção de altitude.

Em conformidade com a equação 6.1 e as particularidades do sistema de baterias dimensionado, a empresa obteve uma corrente de 106.41 A.

Esta equação não corresponde de forma exata à equação utilizada na metodologia proposta, contudo é de ressaltar que o valor de corrente obtido nesta equação, é apenas um valor de referência para auxiliar o utilizador na escolha do sistema de carregadores.

Normalmente as salas onde se encontram as baterias possuem um sistema de climatização, o que permite controlar a temperatura aquando do seu carregamento. Posto isto, o fator de correção de temperatura assume, na maioria das vezes um valor unitário, tendo sido por isso, omitido na equação 4.16 utilizada na metodologia.

A ausência do fator de eficiência e a margem de design reflete-se num valor de corrente inferior, em contrapartida a diferença é pouco significativa, o que não altera a escolha do utilizador no momento de escolha do sistema de carregadores.

Em suma, valida-se a metodologia desenvolvida para o dimensionamento de baterias de chumbo-ácido, mesmo que os valores não sejam exatamente iguais (111.21 A - ferramenta computacional e 106.41 A - projeto de dimensionamento). Esta diferença não é muito acentuada, pelo que a ferramenta pode ser validada.

6.2 Caso 2

O segundo caso de estudo refere-se a um dimensionamento de um sistema de baterias da tecnologia níquel-cádmio. Ao contrário do primeiro caso de estudo, este não se irá basear num projeto real, e, por isso será proposta uma situação hipotética de dimensionamento.

O objetivo deste caso passa por comparar os resultados obtidos a partir da ferramenta computacional desenvolvida com os resultados obtidos por meio de um *software* online desenvolvido pelo fabricante EnerSys.

Este *software* possui algumas limitações, uma vez que apenas permite realizar dimensionamentos para baterias deste fabricante, e não segue passo a passo a norma, tornando difícil a comparação direta dos resultados alcançados ao longo do dimensionamento.

6.2.1 Resultados - Ferramenta Computacional

Neste segundo caso, foram considerados os seguintes dados:

- **Cargas permanentes**
 - A1: duração de 180 minutos; instante de início aos 0 minutos; corrente necessária de 40 A;
 - A2: duração 59 minutos; instante de início aos 180 minutos; corrente necessária de 20 A;
- **Carga momentânea**
 - A3: duração de 60 segundos; instante de início aos 239 minutos; corrente necessária de 100 A;
- **Tensão nominal do sistema:** 110 V
- **Tensão mínima do sistema:** 97 V
- **Tensão máxima do sistema:** 121 V
- **Tensão por célula:** 1.25 V/célula
- **Temperatura mínima:** 15°C
- **Número de células:** 97 células
- **Tensão fim de descarga:** 1.00 V/célula
- **Bateria:** KL120P

De acordo com estes dados foi obtido o perfil de descarga, presente na figura [6.13](#):

Discharge Profile										
Discharge Profile - Battery 1										
1. Period	2. Load	3. Load Change	4. Duration	5. Time to End of Section	6. Kt at t min	7. Tt at t min	8. Required Section Size	+	-	
If A2 greater than A1 proceed to Section 2										
1	A1	40.00	40.00	180.00	180.00	3.2203	1.11	143.28	143.28	0.00
Subtotal 1										143.28
If A3 greater than A2 proceed to Section 3										
1	A1									
2	A2									
Subtotal 2										
Final										
1	A1	40.00	40.00	180.00	240.00	4.1201	1.11	183.31	183.31	0.00
2	A2	20.00	-20.00	59.00	60.00	1.4357	1.15	-32.92	0.00	-32.92
3	A3	100.00	80.00	1.00	1.00	0.5656	1.24	56.02	56.02	0.00
Subtotal 3										206.42

Figura 6.13: Perfil de Descarga - Caso 2

Considerando uma margem de design de 1.05, um fator de envelhecimento de 1.10, e como se trata de uma bateria de níquel-cádmio, não se aplica o fator de correção da temperatura, a capacidade final assume um valor de 235.41 Ah. De acordo com esta capacidade, e a bateria escolhida, é necessário ter 2 strings em paralelo para corresponder à capacidade requisita para a instalação. Cada *string* tem 97 baterias KL120P para satisfazer a tensão nominal de 110 V, sabendo que cada célula de níquel-cádmio tem uma tensão de 1.20 V.

Battery 1	
Correct Size	238.41

↓

Taking into account the required capacity value and the chosen battery, the minimum configuration of the battery system is as follows:	
---	--

Battery 1	
Battery	2x97xKL_120P
Margin (%)	0.66%

Figura 6.14: Cálculo da capacidade final - Caso 2

6.2.2 Comparação de Resultados

No *software* da EnerSys, tal como na ferramenta computacional desenvolvida, o primeiro passo consiste em definir as cargas, para posteriormente ser construído o perfil de consumo. O

gráfico obtido a partir deste *software* é simples e permite compreender as variações de carga ao longo do tempo.

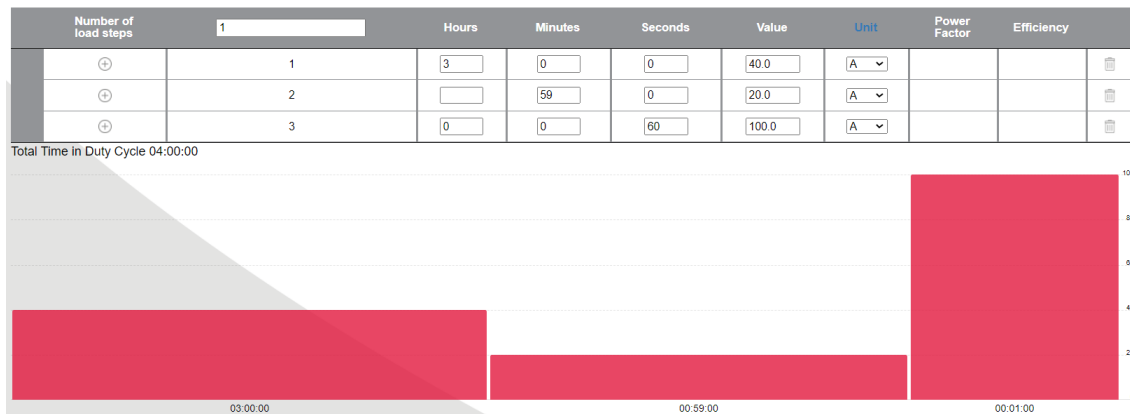


Figura 6.15: Perfil de Consumo obtido no *software* da EnerSys - Caso 2 [41]

Em seguida, o utilizador tem de definir alguns parâmetros, que diferem dos parâmetros inicialmente pedidos na ferramenta. Neste caso, o utilizador tem de definir a tensão mínima das células (parâmetro calculado na ferramenta), o número de células (também calculado na ferramenta), temperatura mínima da instalação, margem de design e fator de envelhecimento - figura 6.16.

Batteries Sizing > Size Battery

Area	EMEA	Minimum Voltage [V]	1.00	☒ [Vpc] ☐ [System]
Sizing Type	☒ IEEE ☐ Standard	Number of Cells	97	
Chemistry	Nickel Cadmium	Minimum Temperature	15	☒ [°C] ☐ [°F]
Application	Utility	Design Margin [1 - 2]	1.05	
Sub Level Application	UPS	Aging Margin [1 - 2]	1.1	
Size	☒ All Cell Types ☐ Specific Cell Types	Apply Float Derating	☒	
Technology	☒ Pocket Plate	Number parallel Strings	Min 1 Max 4	
		Cable Resistance	☐ Yes ☒ No	

Figura 6.16: Dados iniciais no *software* da EnerSys - Caso 2 [41]

Tendo os parâmetros definidos, é calculado o perfil de descarga, figura 6.17.

Cell Sizing Work Sheet - IEEE

Section 1 - 1 Period(s) only - If current 2 is greater than current 1, go to next section							
No	Time	Current	Load change	Period duration	Kt value	Rated Pos	Rated Neg
1	03:00:00	40.000	40.000	03:00:00	3.066	122.651	
Sub Total						122.651	0.000
Total						122.651	

Section 2 - 2 Period(s) only - If current 3 is greater than current 2, go to next section							
No	Time	Current	Load change	Period duration	Kt value	Rated Pos	Rated Neg
1	03:00:00	40.000	40.000	04:00:00			
2	01:00:00	20.000	-20.000	01:00:00			
Sub Total							
Total							

Section 3 - 3 Period(s) only - If current 4 is greater than current 3, go to next section							
No	Time	Current	Load change	Period duration	Kt value	Rated Pos	Rated Neg
1	03:00:00	40.000	40.000	04:01:00	4.052	162.094	
2	01:00:00	20.000	-20.000	01:01:00	1.402		-28.048
3	00:01:00	100.000	80.000	00:01:00	0.726	58.042	
Sub Total						220.136	-28.048
Total						192.088	

Minimum Capacity	192.088
with Derating Factor	192.088
with Temperature Correction	193.049
with Design Margin	202.701
with Aging Factor	222.971
Capacity for a 5.0 h discharge at 20.0 °C with 1.0 V minimum voltage	

Figura 6.17: Perfil de Descarga obtido no *software* da EnerSys - Caso 2 [41]

Face ao perfil de descarga obtido por meio o *software* da EnerSys é evidente que este não segue a norma passo a passo, resultando num método diferente daquele que foi desenvolvido neste trabalho. De seguida, destacam-se as principais diferenças identificadas no perfil de descarga obtido:

- **Ausência do fator derating da temperatura no perfil de descarga:** este *software* não aplica um fator derating da temperatura associado a cada período integrante de uma secção. Em contrapartida, aplica este fator apenas no final do dimensionamento, levando ao desconhecimento da origem deste fator, dado que este depende do tempo de descarga de cada período e da temperatura mínima. Como tal, não se sabe se este fator tem em consideração os diferentes tempos de descarga, se corresponde a uma média dos vários valores do fator, ou se é proveniente de ensaios, cujos valores são desconhecidos;
- **Existência do fator de correção da temperatura:** segundo a norma IEEE1115 [4], no dimensionamento de baterias de níquel-cádmio, depois de aplicado o fator derating da temperatura, não é necessário aplicar outro fator de correção associado à temperatura.

Posto isto, para melhor comparação dos valores obtidos nos dois dimensionamentos, apresenta-se a seguinte tabela com os resultados obtidos na secção 3 do perfil de descarga.

Como no caso anterior, existem determinadas variáveis que não vão exigir comparação, dado que não dependem de cálculos, nem de métodos de aproximação e, por isso, são exatamente iguais.

Tabela 6.2: Comparação de resultados - Caso 2

Variáveis	Ferramenta Computacional	Software da EnerSys
Kt - Período 1	4.120	4.052
Kt - Período 2	1.436	1.402
Kt - Período 3	0.566	0.426
Capacidade Necessária - Período 1	183.31 Ah	162.09 Ah
Capacidade Necessária - Período 2	-32.92 Ah	-28.05 Ah
Capacidade Necessária - Período 3	56.02 Ah	58.04 Ah
Subtotal - Secção 3	206.42 Ah	192.09 Ah
Capacidade Final	238.41 Ah	222.97 Ah

Analisando os resultados apresentados na tabela 6.2, é possível entender de imediato, que os valores do fator K_t são semelhantes nos dois métodos, destacando-se apenas pequena diferença no período 3, sendo que não é uma diferença significativa. Neste caso, não se conhece o método intrínseco do *software* online, porém supõe-se que estes sejam provenientes de estimativas baseadas em ensaios. Assim, valida-se mais uma vez, a metodologia da determinação do fator de classificação da capacidade.

É de notar ainda, a capacidade exigida para a secção 3 (subtotal), que regista um valor inferior no *software*. Tal, é explicado pelo facto deste valor não ter em consideração o fator derating da temperatura.

Observando com atenção a figura 6.17, constata-se que após aplicação do fator derating da temperatura o valor da capacidade não se altera, ou seja, é considerado um valor unitário para este fator. Todavia, é aplicado um fator de correção da temperatura de 1.005. Não possível compreender as considerações que são feitas no método utilizado pelo fabricante EnerSys, dado que não seguem as recomendações da norma.

No final, e, apesar da capacidade final não ser exatamente igual nos dois métodos, resultam na mesma configuração do sistema de baterias 2x97xKL120P, permitindo comprovar o sucesso da ferramenta computacional desenvolvida.

Neste segundo caso, não é possível validar integralmente o método do dimensionamento do sistema de carregamento, dado que este *software* não permite realizar esse cálculo.

Em suma, conclui-se que a ferramenta computacional desenvolvida representa uma melhoria das metodologias já existentes e, segue todas as recomendações das normas.

Capítulo 7

Conclusão e Trabalho Futuro

Este capítulo retrata as principais conclusões obtidas ao longo da realização desta dissertação, assim como as perspectivas para trabalhos futuros.

7.1 Conclusões

A presente dissertação procurou desenvolver uma metodologia, incorporada numa ferramenta computacional, que realizasse o dimensionamento de sistemas de baterias para serviços auxiliares, com o objetivo de otimizar e automatizar o atual processo de dimensionamento.

De modo a desenvolver uma metodologia consistente, procedeu-se a um estudo prévio dos vários elementos do Sistema Elétrico de Energia, desde a produção até ao consumidor final, incluindo os sistemas que integram o tópico principal do trabalho, a bateria. Assim sendo, esta fase revelou-se de extrema importância, pois permitiu facilitar a compreensão da relevância dos Sistemas de Proteção, Comando e Controlo no SEE, bem como a importância dos Sistemas de Alimentação Contínua, que garantem o funcionamento ininterrupto dos SPCC. Por outro lado, esta fase permitiu o estudo das características e particularidades aliadas às duas tecnologias de baterias mais utilizadas em serviços auxiliares e, por consequência, as consideradas na ferramenta computacional (chumbo-ácido e níquel-cádmio).

Na metodologia desenvolvida recorreu-se à adaptação da metodologia já existente, adotada pela empresa e, teve-se o cuidado, em cumprir todas as recomendações das normas associadas ao dimensionamento de baterias para serviços auxiliares.

A ferramenta computacional desenvolvida inclui o processo de dimensionamento de construção de perfis de consumos, capaz de identificar a variação de consumo de uma subestação, ao longo do seu ciclo de trabalho.

Aliado aos perfis de consumo e às características da instalação e do sistema de baterias a ser dimensionado (tensão, temperatura mínima, número de células), a ferramenta possibilita também o dimensionamento do sistema de baterias, que através do perfil de descarga vinculado à bateria escolhida, identifica o pior cenário de falha. Assim, com esta ferramenta, torna-se possível o

cálculo da capacidade necessária para alimentar todos os equipamentos de supervisão, controlo, iluminação de emergência, comunicações e proteção, existentes nas subestações, durante a falha elétrica.

Adicionalmente, criou-se uma base de dados, com os dados e características das baterias dos quatro fabricantes com quem a SISINT trabalha, com o intuito de facilitar o processo de dimensionamento.

No sentido de encontrar uma solução para o sistema de carregamento do sistema de baterias dimensionado, surgiu o cálculo da corrente mínima destes sistemas, auxiliando o utilizador na escolha dos carregadores.

A ferramenta computacional cumpriu com os requisitos iniciais propostos, incorporando todas as funções e deduções necessárias, de modo a promover um conjunto de melhorias, tais como:

- Disponibiliza um base de dados com várias baterias;
- Permite a construção automática de perfis de consumo;
- Realiza o cálculo automático da capacidade exigida para as várias situações de falha elétrica;
- Identifica a configuração mínima do sistema de baterias perante as necessidades da subestação;
- Permite realizar a comparação entre duas tipologias de baterias diferentes;
- Como complemento, calcula a corrente mínima necessária para carregar o sistema de baterias;
- Disponibiliza de forma automática os relatórios dos dimensionamentos do sistema de baterias e do sistema de carregadores;
- Segue as recomendações das normas.

No decorrer do desenvolvimento foram encontrados vários desafios, associados à falta de informação sobre alguns fatores utilizados no dimensionamento, inclusive tentou-se contactar os fabricantes, mas sem sucesso. É compreensível que os fabricantes possam ter muitas reservas na divulgação deste tipo de dados, mas, ainda assim, os desafios foram ultrapassados, resultando na validação da ferramenta.

A SISINT já validou e reconheceu a mais-valia desta solução, na otimização e sistematização do processo de dimensionamento.

7.2 Trabalho Futuro

Tendo em vista a possibilidade de aplicação da seguinte dissertação em trabalhos futuros, apresentam-se algumas sugestões.

Sendo o tema da dissertação as baterias, seria interessante alargar esta ferramenta para outras tipologias de bateria, abrangendo outro tipo de serviços e funções. Neste caso, teriam de ser

introduzidas mais tecnologias de baterias e ter-se-ia de desenvolver outra metodologia de cálculo, seguindo as normas respectivas.

Outra sugestão, seria transferir a ferramenta computacional desenvolvida para uma aplicação web, possibilitando uma maior partilha da metodologia adotada.

Referências

- [1] EDP. "Uma história de dois séculos: Portugal acende a primeira lâmpada", 2019. Disponível em: <https://www.edp.com/pt-pt/historias-edp/uma-historia-de-dois-seculos-portugal-acende-a-primeira-lampada>. Acedido em: 25/10/2022.
- [2] SISINT. Disponível em: <http://www.sisint.pt/>. Acedido em: 4/04/2023.
- [3] IEEE. "IEEE Recommended Practice for Sizing Lead-Acid Batteries for Stationary Applications" in IEEE Std 485-2020 (Revision of IEEE Std 485-2010), 5 Jun. 2020.
- [4] IEEE. "IEEE Recommended Practice for Sizing Nickel-Cadmium Batteries for Stationary Applications" in IEEE Std 1115-2014 (Revision of IEEE Std 1115-2000), 21 Nov. 2014.
- [5] IEEE. "IEEE Guide for the Selection and Sizing of Batteries for Uninterruptible Power for systems" in IEEE Std 1184-1994, 6 Jun. 1995.
- [6] EDP. "Agentes do setor energético", 2021. Disponível em: <https://www.edp.pt/empresas/empresas-com-energia/agentes-do-setor-energetico/>. Acedido em: 25/10/2022.
- [7] ENAT. "Produção em Regime Especial (PRE)". Disponível em: <https://www.enat.pt/pre-producao-em-regime-especial>. Acedido em: 28/10/2022.
- [8] Célia Maria dos Santos Carneiro. "Rede Nacional de Transporte". ISEP - DEE - Neutro à Terra - Revista Técnico-Científica (nº 23), 2019. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.22/15429>. Acedido em: 28/10/2022.
- [9] REN. "Rede Nacional de Transporte", 2021. Disponível em: <https://datahub.ren.pt/pt/redes/>. Acedido em: 29/10/2022.
- [10] E-REDES. "Regulamento de Acesso às Redes e às Interligações do Setor Elétrico", 2020.
- [11] United States Department of Agriculture. "Design Guide for Rural Substations", 2001.
- [12] E-REDES. "Investimento de 2,5 milhões em Guimarães". Disponível em: <https://www.e-redes.pt/pt-pt/noticias/2022/09/20/investimento-de-25-milhoes-em-guimaraes>. Acedido em: 25/11/2022.
- [13] Luces M. Faulkenberry e Walter Coffey. "Electrical Power Distribution and Transmission", 1996.
- [14] Rafaela Viegas Correia. "Sistemas de Proteção, Comando e Controlo e o Paradigma do IEC 61850 – Os Novos Desafios da Manutenção" – Estágio na EDP Distribuição, 2016.

- [15] Michael J. Thompson e David Wilson. "*Auxiliary DC Control Power System Design for Substations*", 2007.
- [16] Pedro Filipe Ferreira Campos. "Desenvolvimento de ferramenta para avaliação da conformidade dos sistemas de alimentação dos Serviços Auxiliares de Subestações", 2019.
- [17] Filipe José Teixeira Ribeiro. "Sistema de gestão de estudos e ensaios aplicado a baterias da rede elétrica de distribuição", 2017.
- [18] EDP Distribuição. "Instalações AT e MT - Sistemas de Alimentação de Corrente Contínua 110/48 Vcc", 2017.
- [19] Mafalda Isabel Guia dos Santos. "Avaliação da Condição dos Sistemas de Alimentação de Corrente Contínua de Subestações e Postos de Corte de AT e MT", 2019.
- [20] Matsusada Precision. "*What happens inside the rechargeable battery during charging and discharging?*", 2021. Disponível em: https://www.matsusada.com/column/battery_chaerge-dischaerge.html. Acedido em: 12/12/2022.
- [21] Tanvir Hossain Md. Mashruf. "*Different types of batteries and developing lead acid batteries*". Disponível em: <http://hdl.handle.net/10361/2337>. Acedido em: 12/12/2022.
- [22] BOSCH Alexandre Quintanilha Vilanova. "Manual de Baterias Bosch", 2007.
- [23] Luís Miguel Sanches Moreira. "Ciclo de Vida dos Sistemas de Proteção Comando e Controlo: Estratégias de Manutenção Versus Investimento", 2009.
- [24] David Linden e Thomas B. Reddy. "Handbook of Batteries". 2001.
- [25] Luís Carlos Vieira Pereira. "Sistema de Gestão de Baterias de Iões de Li Orientado ao Modelo da Bateria", 2013.
- [26] NEWMAX. "Breve história das baterias". Disponível em <https://newmax.com.br/breve-historia-das-baterias/>.
- [27] S. Kitaronka. "*Lead-Acid Battery*". Institute of Sciences, Electrical and Electronics - Engineering Department, 2022.
- [28] Hoppecke. "*Installation, commissioning and operating instructions for valve-regulated stationary lead-acid batteries*". Disponível em: https://www.hoppecke.com/fileadmin/Redakteur/Hoppecke-Main/Products-Import/vrl_manual_en.pdf. Acedido em: 15/12/2022.
- [29] Rolls Battery Technical Support. "*Temperature vs. Capacity*", 2021. Disponível em: <https://support.rollsbattery.com/en/support/solutions/articles/5860-temperature-vs-capacity-flooded-lead-acid-batteries>. Acedido em: 2/12/2022.
- [30] PVEducation. "*Characteristics of Lead Acid Batteries*". Disponível em: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/lead-acid-batteries/characteristics-of-lead-acid-batteries>. Acedido em: 5/12/2022.
- [31] U.S. Department of Energy. "*PRIMER ON LEAD-ACID STORAGE BATTERIES*", Setembro 1995. DOE-HDBK-1084-95.

- [32] Mário R. Pedro César A.C. Sequeira. *"Lead-Acid Battery Storage"*, Departamento de Engenharia Química e Biológica, Instituto Superior Técnico, 2007.
- [33] M. Martin P. Dost e C. Sourkounis. *"Impact of lead-acid based battery design variations on a model used for a battery management system"*, MedPower 2014, Athens, 2014.
- [34] First National Battery. *"Industrial Lead Acid Batteries: Types and Their Selection"*.
- [35] Sistemas e Tecnologia Aplicada. "Baterias NiCd". Disponível em: <https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-recarregaveis/baterias-de-nicd/formatos-de-baterias>. Acedido em: 8/12/2022.
- [36] HOPPECKE. *"Battery systems for stationary applications"*.
- [37] Power Sonic. *"How to Charge Lead Acid batteries"*. Disponível em: <https://www.power-sonic.com/blog/how-to-charge-a-lead-acid-battery/>. Acedido em: 19/12/2022.
- [38] La MARCHE Don Henry e Jose Rolon. *"Battery Charger Sizing Options"*.
- [39] Digikety. *"Charging Lead Acid Battery Basics"*. Disponível em: <https://forum.digikey.com/t/charging-lead-acid-battery-basics/13121>. Acedido em: 19/12/2022.
- [40] SAFT. *"DC System Sizing Principles"*.
- [41] EnerSys. *"Battery Sizing"*. Disponível em: <https://www.enersys.com/pt-br/>. Acedido em: 17/05/2023.

Anexo A

Relatórios

A.1 Relatório do Dimensionamento do Sistema de Baterias - Caso 1

BATTERY SIZING REPORT

Document Number: 16062023
Title: Subestação A
Client: Validação da Metodologia

Prepared: Inês Santos
Date: 16/06/2023
Version: 1

1. LOAD PROFILE

The load profile is characterized as follows:

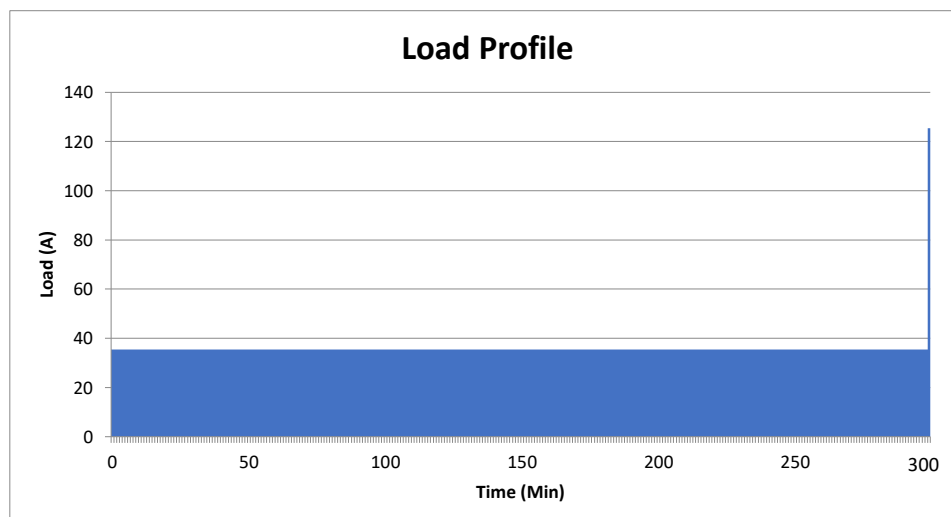
Load Tag	Begin (min)	End (min)	Load (A)
A1	0	299	35.41
A2	299	300	125.45

Table 1 - Loads Specifications

A1 : Corresponds only to the permanent loads, with duration of 299.00 minutes.

A2 : Corresponds only to the momentary loads, with duration of 1.00 minutes.

The permanent loads correspond to loads that usually require power from the battery bank during the entire discharge cycle and are characterized by low power consumption. Momentary loads have a high current and last less than or equal to 1 minute.



2. BATTERY SIZING

Once the permanent and momentary loads are established, the capacity required for the consumptions during the discharge regime of the battery bank is calculated according to the procedure indicated in the IEEE Standard Std 1115 - 2014 "IEEE Recommended Practice for Sizing Nickel-Cadmium Batteries for Stationary Applications".

2.1 Calculation Parameters

For capacity calculations of battery banks, the following parameters and limits shall be

Nominal System Voltage (Vdc):	110
Minimum System Voltage (Vdc):	93.5
Maximum System Voltage (Vdc):	121
Cell Voltage (V/cell):	2.27
Temperature (°C):	20

2.1.1 Number of cells

$$\text{Number of Cells} = \frac{V_{\max}}{V_{\text{cell}}} = \frac{121}{2.27} = 53.304 \text{ cells}$$

Number of cells needed: 54 cells

2.1.2 End of Discharge Voltage (EODV)

$$\text{EODV} = \frac{V_{\min}}{N_{\text{cells}}} = \frac{93.5}{54} = 1.73 \text{ Vpc}$$

2.2 Calculation of Required AH Capacity

The capacity of the bank of batteries is determined by the following expression:

$$\text{AH} = \max_{S=1}^{S=N} \sum_{P=1}^{P=S} [A_p - A_{p-1}] \times K_T$$

Where:

AH - cell size (uncorrected for temperature, aging and design margin)

S - section of the duty cycle being analyzed

N - number of periods in the duty cycle

P - period being analyzed

A_p - amperes required for Period P

K_t - capacity rating factor

2.2.1 Capacity Rating Factor

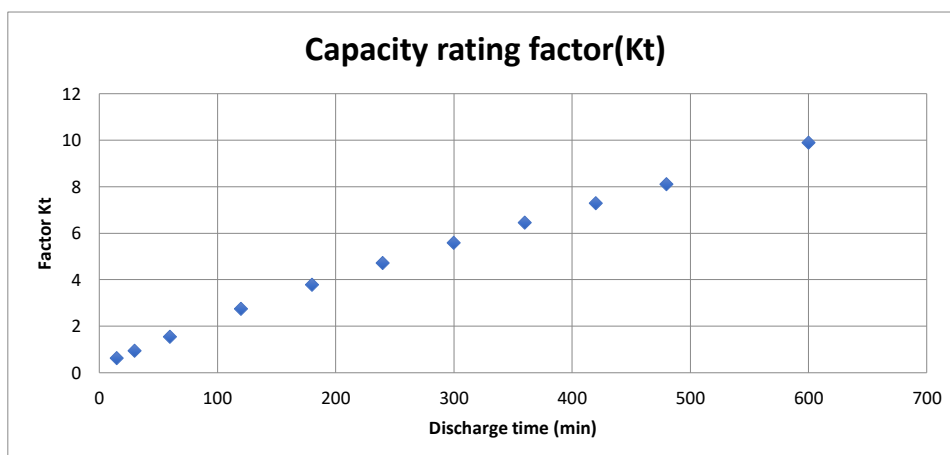
The Kt factor it's obtained by the following expression:

$$K_T = \frac{\text{Rated Ampere Hour Capacity [at a standard time rate as } T^{\circ}\text{C and EODV]}}{\text{Ampere that will be supplied at } T^{\circ}\text{C to a given end of discharge voltage}}$$

Considering the selected batteries (12FIT180) and that the end of discharge voltage per cell will be 1.73 Vpc, the discharge curve for 1.75 Vpc will be used in the calculation. The following table shows the values provided by the manufacturer (discharge times and currents) and the respective Kt calculated from the aforementioned expression.

Discharge Table		
Time (min)	Current (A)	Kt (teoric)
15	284	0.6338
30	189	0.9524
60	117	1.5385
120	65.7	2.7397
180	47.6	3.7815
240	38.2	4.7120
300	32.2	5.5901
360	27.9	6.4516
420	24.7	7.2874
480	22.2	8.1081
600	18.2	9.8901

Table 2 - Discharge time and factor Kt



From the various values of K_t , it is possible to make an approximation to a polynomial function and calculate the values of K_t for times not specified by the manufacturer. The function follows the following expression:

$$K_t(t) = a \times t^2 + b \times t + c$$

Taking into account the graphic the coefficients are:

$$a = -5.49E-06$$

$$b = 1.88E-02$$

$$c = 0.44$$

2.2.2 Discharge Profile

Finally the calculation of the battery capacity is the following:

1. Period	2. Load	3. Load Change	4. Duration	5. Time to End of Section	6. Kt at t min	7. Required Size	Positive Values	Negative Values	
If A2 greater than A1 proceed to Section 2									
1	A1								
						Subtotal 1			
Final									
1	A1	35.41	35.41	299.00	300.00	5.5993	198.27	198.27	0.00
2	A2	125.45	90.04	1.00	1.00	0.4585	41.28	41.28	0.00
							Subtotal 2		239.56

According to the calculations, the minimum capacity that the battery system will have is: 239.56 Ah.

According to point 6.3.3 of the IEE Std 485 standard, it is prudent to provide a capacity margin. A method of providing this design margin is to add 10% to 15% to the cell size determined by calculations.

$$\begin{array}{lcl} \text{Design Margin:} & 1.10 & \\ \text{Correct Size (Ah) =} & 239.56 \times 1.10 & = 263.51 \end{array}$$

2.2.4 Aging Factor

According to the point 6.3. of the IEEE Std 485 it is recommended to consider an aging factor of 1.25.

$$\begin{array}{lcl} \text{Aging Factor :} & 1.25 & \\ \text{Correct Size (Ah):} & 263.51 \times 1.25 & = 329.39 \end{array}$$

2.2.5 Correct Size

With the values of the temperature correction factor, design margin, aging factor and the maximum value obtained from the discharge profile capacity, it is then possible to calculate the correct size, which corresponds to the product of all values.

$$\text{Correct Size} = \text{Incorrect Size} \times \text{Temperature Correction Factor} \times \text{Design Margin} \times \text{Aging Factor}$$

Incorrect Size (Ah):	239.56
Temperature Correction Factor:	1.000
Design Margin:	1.10
Aging Factor:	1.25
Correct Size (Ah):	329.54

Taking into account the required capacity value and the chosen battery, the minimum configuration of the battery system is as follows:

Battery System:	2x9x12FIT180
-----------------	--------------

A.2 Relatório do Dimensionamento do Sistema de Carregamento - Caso 1

CHARGER SIZING REPORT

Document Number: 16062023 **Prepared:** Inês Santos
Title: Subestação A **Date:** 16/06/2023
Client: Validação da Metodologia **Version:** 1

The capacity of the battery chargers is determined by the following equation:

$$C = \left(\frac{EF \times AH}{RT} + CL \right) \times DM \times AD$$

EF - Efficiency

For lead-acid batteries, a charging efficiency factor of 1.15 is assumed and for nickel-cadmium batteries, a factor of 1.40 is assumed.

$$EF = 1.15$$

AH - Capacity of the Battery Bank

$$AH = 329.54 \text{ Ah}$$

RT - Recharge Time

$$RT = 5h$$

CL - Continuous Load

$$CL = 35.41A$$

DM - Design Margin

$$DM = 1$$

AD - Altitude Derating

For heights below 915 meters is assumed the value 1 and for heights greater than 915 meters is add 6.7% for every 915 meters.

$$AD = 1.000 \quad \text{Height} = 215m$$

C- Minimum Charger Current

$$C = 111.203 \text{ A}$$

The chargers must have an output current higher than 111.203 A.

A.3 Relatório do Dimensionamento do Sistema de Baterias - Caso 2

BATTERY SIZING REPORT

Document Number: 16062023 **Prepared:** Inês Santos
Title: Caso 2 **Date:** 16/06/2023
Client: Validação da Metodologia **Version:** 1

1. LOAD PROFILE

The load profile is characterized as follows:

Load Tag	Begin (min)	End (min)	Load (A)
A1	0	180	40
A2	180	239	20
A3	239	240	100

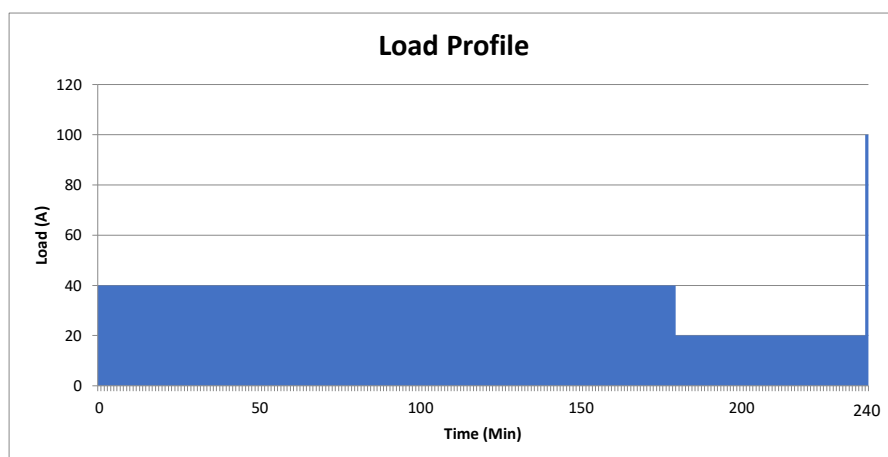
Table 1 - Loads Specifications

A1 : Corresponds only to the permanent loads, with duration of 180.00 minutes.

A2 : Corresponds only to the permanent loads, with duration of 59.00 minutes.

A3 : Corresponds only to the momentary loads, with duration of 1.00 minutes.

The permanent loads correspond to loads that usually require power from the battery bank during the entire discharge cycle and are characterized by low power consumption. Momentary loads have a high current and last less than or equal to 1 minute.



2. BATTERY SIZING

Once the permanent and momentary loads are established, the capacity required for the consumptions during the discharge regime of the battery bank is calculated according to the procedure indicated in the IEEE Standard Std 1115 - 2014 "IEEE Recommended Practice for Sizing Nickel-Cadmium Batteries for Stationary Applications".

2.1 Calculation Parameters

For capacity calculations of battery banks, the following parameters and limits shall be

Nominal System Voltage (Vdc):	110
Minimum System Voltage (Vdc):	97
Maximum System Voltage (Vdc):	121
Cell Voltage (V/cell):	1.25
Temperature (°C):	15

2.1.1 Number of cells

$$\text{Number of Cells} = \frac{V_{\max}}{V_{\text{cell}}} = \frac{121}{1.25} = 96.800 \text{ cells}$$

Number of cells needed: 97 cells

2.1.2 End of Discharge Voltage (EODV)

$$\text{EODV} = \frac{V_{\min}}{N_{\text{cells}}} = \frac{97}{97} = 1.00 \text{ Vpc}$$

2.2 Calculation of Required AH Capacity

The capacity of the bank of batteries is determined by the following expression:

$$\text{AH} = \max_{S=1}^{S=N} \sum_{P=1}^{P=S} [A_p - A_{p-1}] \times K_T$$

Where:

AH - cell size (uncorrected for temperature, aging and design margin)

S - section of the duty cycle being analyzed

N - number of periods in the duty cycle

P - period being analyzed

A_p - amperes required for Period P

K_t - capacity rating factor

2.2.1 Capacity Rating Factor

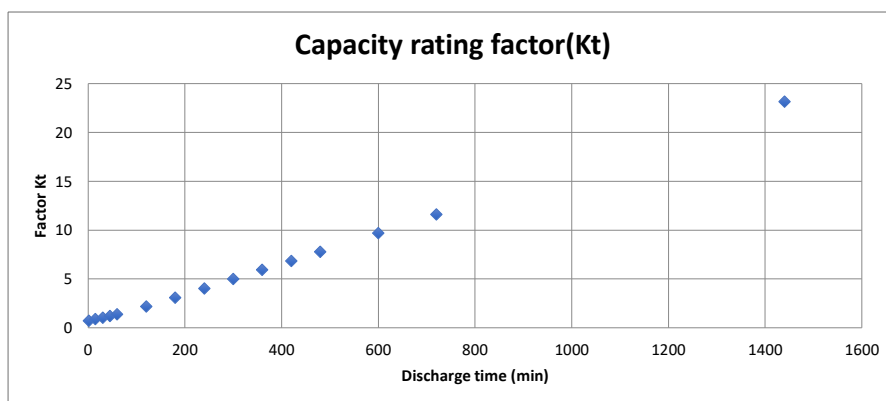
The Kt factor it's obtained by the following expression:

$$K_T = \frac{\text{Rated Ampere Hour Capacity [at a standard time rate as T}^\circ\text{C and EODV]}}{\text{Ampere that will be supplied at T}^\circ\text{C to a given end of discharge voltage}}$$

Considering the selected batteries (KL_120P) and that the end of discharge voltage per cell will be 1 Vpc, the discharge curve for 1 Vpc will be used in the calculation. The following table shows the values provided by the manufacturer (discharge times and currents) and the respective Kt calculated from the aforementioned expression.

Discharge Table		
Time (min)	Current (A)	Kt (teoric)
1	165.4	0.7255
15	133.8	0.8969
30	116.6	1.0292
45	99.21	1.2096
60	86.3	1.3905
120	55.4	2.1661
180	39.14	3.0659
240	29.73	4.0363
300	24	5.0000
360	20.22	5.9347
420	17.51	6.8532
480	15.42	7.7821
600	12.39	9.6852
720	10.34	11.6054
1440	5.186	23.1392

Table 2 - Discharge time and factor Kt



From the various values of K_t , it is possible to make an approximation to a polynomial function and calculate the values of K_t for times not specified by the manufacturer. The function follows the following expression:

$$K_t(t) = a \times t^2 + b \times t + c$$

Taking into account the graphic the coefficients are:

$$a = 6.97E-07$$

$$b = 1.47E-02$$

$$c = 5.51E-01$$

2.2.2 Discharge Profile

Finally the calculation of the battery capacity is the following:

1. Period	2. Load		3. Load Change	4. Duration	5. Time to End of Section	6. Kt at t min	7. Tt at t min	8. Required Size	Positive Values	Negative Values
If A2 greater than A1 proceed to Section 2										
1	A1	40.00	40.00	180.00	180.00	3.2203	1.11	143.28	143.28	0.00
Subtotal 1									143.28	0.00
If A3 greater than A2 proceed to Section 3										
1	A1									
2	A2									
Subtotal 2										
Final										
1	A1	40.00	40.00	180.00	240.00	4.1201	1.11	183.31	183.31	0.00
2	A2	20.00	-20.00	59.00	60.00	1.4357	1.15	-32.92	0.00	-32.92
3	A3	100.00	80.00	1.00	1.00	0.5656	1.24	56.02	56.02	0.00
Subtotal 3									206.42	0.00

According to the calculations, the minimum capacity that the battery system will have is: 206.42 Ah.

According to point 6.3.3 of the IEE Std 485 standard, it is prudent to provide a capacity margin. A method of providing this design margin is to add 10% to 15% to the cell size determined by calculations.

$$\begin{array}{lcl} \text{Design Margin:} & 1.05 & \\ \text{Correct Size (Ah) =} & 206.42 \times 1.05 = & 216.74 \end{array}$$

2.2.4 Aging Factor

According to the point 6.3. of the IEEE Std 485 it is recommended to consider an aging factor of 1.25.

$$\begin{array}{lcl} \text{Aging Factor :} & 1.10 & \\ \text{Correct Size (Ah):} & 216.74 \times 1.10 = & 238.41 \end{array}$$

2.2.5 Correct Size

With the values of the temperature correction factor, design margin, aging factor and the maximum value obtained from the discharge profile capacity, it is then possible to calculate the correct size, which corresponds to the product of all values.

$$\text{Correct Size} = \text{Incorrect Size} \times \text{Temperature Correction Factor} \times \text{Design Margin} \times \text{Aging Factor}$$

Incorrect Size (Ah):	206.42
Temperature Correction Factor:	1.000
Design Margin:	1.05
Aging Factor:	1.10
Correct Size (Ah):	238.41

Taking into account the required capacity value and the chosen battery, the minimum configuration of the battery system is as follows:

Battery System:	2x97xKL_120P
-----------------	--------------