

Interligação de Pequenos Sistemas de Energia

Mário Rui Canatário Marques

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Júri

Presidente: Prof. Doutor Gil Domingos Marques
Orientador: Prof. Doutor João José Esteves Santana
Co-Orientador: Prof^a Doutora Maria José Ferreira dos Santos Lopes de Resende
Vogal: Prof. Doutor José Pedro da Silva Sucena Paiva

Setembro de 2007

Resumo

Os primeiros sistemas de transmissão de energia foram em corrente contínua, nos primórdios da Engenharia Electrotécnica. Apesar do desenvolvimento e grande expansão dos sistemas em corrente alternada, o aperfeiçoamento dos sistemas de transmissão em DC nunca estagnou. O contínuo progresso dos semicondutores, permite que esta tecnologia tenha um impacto significativo nos sistemas de transmissão de energia, sendo muitas vezes usada no melhoramento da eficiência das redes eléctricas, o que faz deste tipo de transmissão uma alternativa fiável ao sistema tradicional.

Neste trabalho, estuda-se a possibilidade de utilizar esta tecnologia na interligação das ilhas do Bloco Central dos Açores, com o objectivo de obter uma melhoria da sua eficiência energética. Tendo em conta a situação actual das três ilhas, três pequenos sistemas isolados, abordam-se os aspectos mais importantes numa rede interligada, como o decréscimo acentuado dos custos de funcionamento de todo o sistema. Foram, ainda, dimensionados os valores de potência a transitar, sem nunca esquecer o caso em estudo.

Abordam-se, igualmente, as variáveis mais importantes no funcionamento de todo o equipamento, bem como os fenómenos que as influenciam. Os principais componentes e sua constituição são também estudados e, no âmbito da tecnologia proposta, são demonstradas as respectivas vantagens, o que permitirá conhecer detalhes de um sistema de transmissão em clara expansão.

Foi, ainda, caracterizado o percurso possível dos cabos submarinos e os seus aspectos construtivos mais importantes. A componente financeira, tem grande importância na árvore de decisão deste estudo, sendo por isso, muitas vezes, realçada.

Palavras chave:

Qualidade da energia – Corrente Contínua – Ondulador – IGBT – Cabos de transmissão.

Abstract

Direct current was the first type of transmission system used in very early days of electrical engineering. Even though the AC transmission system came later on to play a very important role, the development of DC transmission has always carried on. The ever increasing progress of semiconductor technology continues to have a significant impact on the development of advanced power electronic apparatus used to support operations. This apparatus is also used to provide an efficient management of electrical grids, turning this kind of transmission into a reliable alternative regarding the traditional system.

This paperwork is intended to study the possibility to use this technology in the interconnection of the central bloc of the Azores Islands. The purpose is to improve its energetic efficiency. Taking the three islands situation into account, the most important aspects in an interconnected network, as well as the most important variables for the working of the whole equipment were analysed. Moreover and without forgetting the case in analysis, the values of the power to reallocate were dimensioned.

In addition the most important constructive aspects of submarines cables were characterized. In this technical-economical analysis, the financial component is extremely relevant in this study's decision's tree. It is therefore many times put into the shot light.

Key-words: Power Quality – Direct Current – Converter – IGBT – Cable Transmission.

Lista de Símbolos

I_{ini} – Custo Inicial

I_{res} – Custo Residual

C_V – Custo Variável

C_F – Custo Fixo

V_M – Valor Máximo da Tensão

X_P – Amplitude da Portadora

X_M – Amplitude da Modulante

Abreviaturas

EDA – Electricidade dos Açores

HVDC – High Voltage Direct Current

IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor

MT – Média Tensão

BT – Baixa Tensão

TIEPI – Tempo de Interrupção Equivalente da Potência Instalada

SAIDI – Duração Média das Interrupções nas Redes de Distribuição de MT ou BT

SAIFI – Frequência Média de Ocorrência de Interrupções na Rede de Distribuição de MT ou BT

f.e.m. – Força Electromotriz

PIB – Produto Interno Bruto

UE – União Europeia

PWM – Pulse Width Modulation

PVC – Poli Cloreto de Vinila

AIA – Avaliação Ambiental Estratégica

EIA – Estudo de Impacte Ambiental

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Motivações e Objectivos do Trabalho	1
1.2.	Abordagem e Organização do Texto.....	3
2.	Aspectos Importantes numa Rede Eléctrica Interligada	5
2.1.	Vantagens de uma Rede Interligada	5
2.1.1	Incremento na Qualidade de Energia	5
2.1.2	Vantagens Intrínsecas da Interligação	9
2.2.	Aspectos a Analisar no Projecto.....	10
3.	Situação Actual no Bloco Central dos Açores	13
3.1.	Caracterização Populacional	13
3.2.	Centrais Térmicas Existentes	16
4.	Custos nas Centrais em Análise	19
4.1.	Variação do Custo Variável	19
4.2.	Variação do Custo Fixo	21
4.3.	Energia Não Fornecida.....	23
5.	Análise da Potência a Transitar.....	25
6.	Ligação em Corrente Contínua	29
6.1.	Principais Componentes.....	30
6.1.1	Constituição dos Onduladores de Tensão	31
6.1.2	Transformador.....	34
6.1.3	Filtro AC.....	37
6.1.4	Filtro DC	40
6.1.5	Disjuntores de Corrente Alternada.....	41
6.1.6	Outros componentes	41
6.2.	Vantagens de uma Ligação em Corrente Contínua	41
7.	Análise do Funcionamento do Ondulador	45
7.1.	Comando do Ondulador e Princípio de Funcionamento	45
7.2.	Vantagens e Desvantagens deste comando.....	51
7.3.	Análise do conteúdo harmónico	51
7.4.	Analogia deste conversor com a máquina síncrona	53
7.5.	Trânsito de Potência no Ondulador.....	55
8.	Caracterização dos cabos da Interligação	59
8.1.	Aspectos construtivos.....	59

8.1.1	Condutor.....	60
8.1.2	Materiais Isolantes	60
8.1.3	Camadas Semicondutores	61
8.1.4	Écrans Metálicos	61
8.1.5	Armaduras	62
8.1.6	Bainhas Exteriores	63
8.2.	Dimensão dos cabos da interligação.....	64
8.3.	Comparação dos possíveis cenários.....	66
9.	Simulação	71
10.	Conclusões.....	77
10.1.	Resumo dos Capítulos	77
10.2.	Conclusões Gerais	79
10.3.	Acções Futuras.....	81
	REFERÊNCIAS	83
	ANEXOS.....	85
A.	ESQUEMA DO PERCURSO DOS CABOS	85
B.	ESBOÇO DA AVALIAÇÃO DE IMPACTE AMBIENTAL DA INTERLIGAÇÃO.....	89

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Evolução da capacidade de transferência em sistemas DC [Farhad].....	2
Figura 3.1 – Consumo de electricidade per capita nos Estados-membros da UE em 1996 (Fonte: EUROPROG Report, 1996).....	13
Figura 3.2 – Evolução do consumo de electricidade per capita em Portugal Continental e Espanha Peninsular. Período 1995 – 2005. [REN].....	14
Figura 3.3 – Evolução do número de clientes EDA [RARI_EDA_2005].	14
Figura 5.1 – Ilha do Pico, valores de Ponta e Vazio [RARI_EDA_2005].	25
Figura 5.2 – Ilha de São Jorge, valores de Ponta e Vazio [RARI_EDA_2005].	25
Figura 5.3 – Ilha do Faial, valores de Ponta e Vazio [RARI_EDA_2005].	26
Figura 6.1 – Figura representativa dos principais elementos existentes numa ligação entre ilhas [ABB_HVDC].	30
Figura 6.2 – a) estrutura do IGBT; b) Símbolo electrónico para o IGBT como um transistor bipolar de porta isolada.	31
Figura 6.3 – Constituição de um módulo do ondulador.	33
Figura 6.4 – Figura elucidativa do modo de ligação dos transformadores presentes na conexão entre ilhas.	36
Figura 6.5 – Figura representativa dos principais elementos existentes numa ligação entre ilhas [ABB_HVDC].	37
Figura 6.6 – Importância do filtro AC na forma de onda da tensão.	39
Figura 6.7 – Figura representativa dos elementos constituintes, de uma fase, de um dos extremos da ligação [ABB_HVDC].	40
Figura 6.8 – Esquema equivalente em π de uma linha.	42
Figura 6.9 – Esquema equivalente de uma linha curta.	42
Figura 7.1 – Controlo PWM de 3 níveis (modulação sinusoidal).	46
Figura 7.2 – Ligação do ondulador ao transformador em estrela.	48
Figura 7.3 – Ligação do ondulador ao transformador em triângulo.	49
Figura 7.4 – Circuito simples de Comando.	49
Figura 7.5 – Diagrama simples do circuito estudado.	50
Figura 7.6 – Amplitudes das harmónicas no controlo PWM de 3 níveis (modulação sinusoidal) [Labrique].	52
Figura 7.7 – Máquina síncrona (gerador): a) esquema monofásico equivalente; b) diagrama de fases.	54
Figura 7.8 – Variação do funcionamento da Máquina Síncrona.	54
Figura 7.9 – Diagramas de funcionamento do Conversor – Potência Activa.	55
Figura 7.10 – Diagramas de funcionamento do Conversor – Potência reactiva.	56
Figura 8.1 – Estrutura base do cabo a usar na interligação.	59
Figura 8.2 – Esquemático dos cabos usados pela ABB.	63

Figura 8.3 – Posicionamento dos diferentes troços da interligação.	64
Figura 8.4 – Imagem satélite da ligação entre ilhas (perspectiva 1).....	64
Figura 8.5 – Imagem satélite da ligação entre ilhas (perspectiva 2).....	65
Figura 8.6 – Troço 1 entre as ilhas de Pico e Faial (o esquema não está à escala).....	66
Figura 8.7 – Troço 2 entre as ilhas de S. Jorge e Pico (o esquema não está à escala).	66
Figura 8.8 – Troço 3 entre as ilhas de S. Jorge e Faial (o desenho não está à escala).	66
Figura 9.1 – Esquema do circuito simulado.	71
Figura 9.2 – Forma de onda da tensão contínua entre ambos os condutores, valor médio.	72
Figura 9.3 – Forma de onda da corrente no circuito contínuo, valor médio.	72
Figura 9.4 – Forma de onda da tensão na carga, circuito alternado.	73
Figura 9.5 – Forma de onda da tensão composta, circuito alternado.....	73
Figura 9.6 – Forma de onda da corrente na carga, circuito alternado.....	73
Figura 9.7 – Forma de onda da tensão na carga com filtro LC, circuito alternado.....	74
Figura 9.8 – Forma de onda da tensão composta com filtro LC, circuito alternado.	74
Figura 9.9 – Forma de onda da corrente na carga com filtro LC, circuito alternado.	75
Figura 9.10 – Posicionamento do filtro AC.....	75
Figura A.1 – Troço marítimo 1 entre as ilhas de Pico e Faial.	85
Figura A.2 – Troço marítimo 2 entre as ilhas de S. Jorge e Pico.	85
Figura A.3 – Troço marítimo 3 entre as ilhas de S. Jorge e Faial.....	85
Figura A.1-2 – Ligação das ilhas do Bloco Central através de cabos submarinos.....	86
Figura B.2 – Processo geral de AIA em Portugal.	90
Figura B.3 – Exemplo de um anúncio de uma “Consulta Pública” de um procedimento de AIA em Portugal (anúncio publicado no <i>Jornal do Algarve</i> , 2002-11-20).....	91

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Número Mensal de interrupções por ilha [EDA_RQS].	6
Tabela 2.2 – Interrupções em 2006, por ilha [EDA_RQS].	6
Tabela 2.3 – Valores limite para os indicadores de qualidade de energia [RQS].	7
Tabela 2.4 – Valores dos indicadores por ilha, Média Tensão [EDA_RQS].	7
Tabela 3.1 – Características das ilhas em estudo, valores de 2005 [RARI_EDA_2005].	15
Tabela 3.2 – Características técnicas dos grupos gerador/motor presentes na Central do Pico.	17
Tabela 3.3 – Características técnicas dos grupos gerador/motor presentes na Central do Caminho Novo.	17
Tabela 3.4 – Características técnicas dos grupos gerador/motor presentes na Central de Santa Bárbara.	18
Tabela 4.1 – Potência instalada em cada ilha, referente a 2005 (valores em kW) [RARI_EDA_2005].	19
Tabela 4.2 – Custo dos combustíveis fósseis [ERSE].	19
Tabela 4.3 – Consumo médio dos motores existentes em cada Ilha [RARI_EDA_2005].	20
Tabela 4.4 – Produção eléctrica anual em cada ilha [RARI_EDA_2005].	20
Tabela 4.5 – Custo variável em cada ilha, ano de 2005.	21
Tabela 4.6 – Novo custo variável em cada ilha, ano de 2005.	21
Tabela 4.7 – Quadro resumo dos custos fixos.	22
Tabela 4.8 – Energia não fornecida no ano de 2006 [EDA].	23
Tabela 8.1 – Valores típicos das características dos materiais usados habitualmente em cabos eléctricos [Cabelte].	60
Tabela 8.2 – Características do polietileno reticulado [Cabelte].	61
Tabela 8.3 – Critérios a considerar na escolha de materiais para bainhas exteriores	63
Tabela 8.4 – Cálculo das perdas nos vários troços.	67
Tabela 8.5 – Cálculo das perdas nos vários troços.	68

1. Introdução

A transmissão de energia iniciou-se em corrente contínua no ano de 1882. A primeira central eléctrica, situada em Pearl Street, New York, fornecia energia eléctrica em corrente contínua, com a tensão de 110V.

A possibilidade de variar a tensão com o transformador e a utilização da máquina assíncrona, determinaram a dominância da corrente alternada até aos dias de hoje. Porém, as vantagens da corrente contínua, em algumas aplicações são significativas, nomeadamente no transporte a longa distância e nas travessias submarinas. O aparecimento de dispositivos electrónicos capazes de converter tensões e correntes elevadas, permite encarar a corrente contínua como forma de transmitir e utilizar energia eléctrica.

1.1. Motivações e Objectivos do Trabalho

Na última década tem-se verificado um aumento significativo dos sistemas de transmissão em corrente contínua, nomeadamente nos países do norte da Europa e no fornecimento de energia a muitas plataformas petrolíferas.

Ao longo dos anos, foram feitas muitas evoluções neste tipo de transmissão, sendo a primeira feita por Thury em 1889 o seu sistema foi usado na Europa de 1890 até 1937. Este consistia na combinação de geradores AC/DC e motores ligados em série no lado DC e em paralelo no lado AC. Mais tarde, conversores baseados em comutações mecânicas foram testados em Inglaterra e Suécia na década de 1920 e 1930. Já nos Estados Unidos, a companhia General Electric construiu conversores para transmissões DC na década de 1930. Estes conversores usavam válvulas de mercúrio, que estiveram em operação de 1937 a 1945. A primeira instalação a ser comercializada foi em Gotland na Suécia, em 1954 o sistema utilizava válvulas de vapor de mercúrio de alta tensão, permitindo a transmissão de 20MW através de um cabo submarino à tensão de 110kV, com um comprimento de 90 km.

No final da década de 1960, foram introduzidos semicondutores que permitiram o melhor desempenho desta técnica. O primeiro sistema experimental a funcionar com tiristores foi implantado em meados de 1970 em Gotland. Passados 2 anos, em 1972, foi instalado o primeiro equipamento que funcionava totalmente a tiristores, com uma potência de 360 MW, em Eel River, New Brunswick no Canadá. Durante as décadas de 1970 e 1980, numerosas transmissões em DC foram construídas em todo o mundo, a figura seguinte demonstra essa evolução.

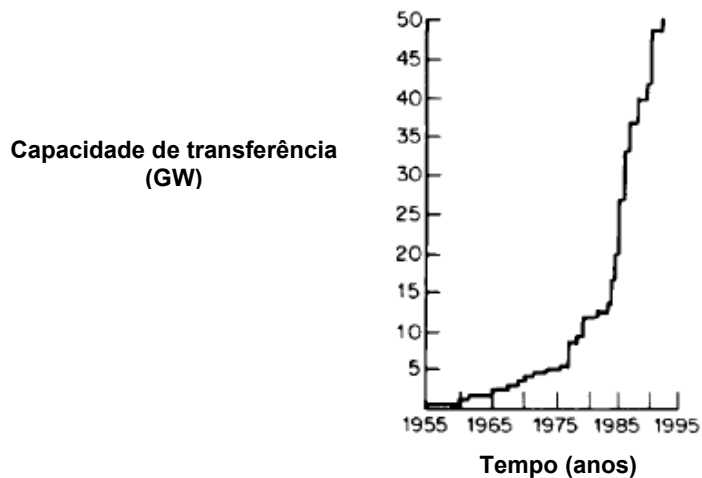


Figura 1.1 – Evolução da capacidade de transferência em sistemas DC [Farhad].

Como se pode constatar o crescimento desta tecnologia tem sido quase exponencial, pelo que suas vantagens serão expostas mais à frente. Neste seguimento, a opção de utilizar esta tecnologia na interligação das ilhas do Bloco Central dos Açores deve ser tomada em conta e o estudo da viabilidade da sua aplicação será um dos objectivos do presente trabalho.

As tensões de trabalho dos sistemas de transmissão de corrente contínua atingem ordens de grandeza elevadas. Consequentemente, cada elemento de rectificação das duas pontes é uma associação complexa de semicondutores (em série e paralelo) de modo a poder suportar a tensão e a corrente em jogo. Devido às potências nas duas extremidades, a filtragem das componentes harmónicas das correntes do lado alternado dos onduladores é particularmente importante e necessita de filtros volumosos.

Nos últimos anos tem havido uma grande evolução na tecnologia DC, que a tem tornado mais competitiva em relação ao sistema alternado. Este desenvolvimento tem um efeito positivo na fiabilidade de todo o sistema e no seu custo, pode-se destacar:

- Aumento da capacidade dos semicondutores que constituem o ondulador.
- Evolução na arquitectura de ligação dos vários semicondutores.
- Uso da comutação forçada.
- Aplicação de electrónica digital e fibra óptica no controlo dos onduladores.

As ilhas aqui em estudo têm tido nos últimos anos um forte crescimento do consumo de energia, assim, no futuro a sua interligação, será uma hipótese que deve ser estudada, motivada pelo incremento da qualidade de energia e diminuição dos custos e outras vantagens explicadas mais à frente.

1.2. Abordagem e Organização do Texto

A presente dissertação é constituída por 10 capítulos e 2 anexos. O tema principal é a Interligação de Pequenos Sistemas de Energia, em que o caso em estudo, é a interligação das três ilhas do Bloco Central dos Açores: Faial, Pico e São Jorge.

Ao presente capítulo de introdução, sucede o capítulo 2, em que são apresentados os aspectos mais importantes de uma rede interligada, nomeadamente as suas vantagens e aspectos a analisar no seu projecto. As vantagens apresentadas estão sobretudo ligadas à qualidade de energia fornecida e outras intrínsecas à própria interligação, como o decréscimo dos custos de produção. Esta temática será analisada em profundidade no capítulo 4.

No capítulo 3 é retratada a situação actual das 3 ilhas em estudo, mais precisamente a caracterização populacional, onde é feita uma análise do tipo de consumidores e sua evolução em analogia com outros países. É feita, também, uma abordagem às centrais térmicas presentes nas ilhas, dados esses fornecidos pela EDA.

No capítulo 4 calcula-se a variação nos custos de produção com a realização do projecto em estudo, designadamente, os custos relacionados com os combustíveis e os custos fixos inerentes ao funcionamento das centrais em estudo. Também foi analisado o custo da energia não fornecida no ano de 2006, devido às interrupções longas.

No capítulo 5, são apresentados os valores de potência a transitar, sendo estes importantes no dimensionamento do equipamento a utilizar e é feita uma estimativa da potência para um intervalo de tempo razoável.

O capítulo 6 desenvolve os aspectos considerados principais numa ligação em corrente contínua, assim como os componentes que constituem a ligação e as vantagens em relação ao sistema alternado. Dos componentes em análise destaca-se os onduladores de tensão, transformadores, filtros AC e DC e os disjuntores de corrente alternada.

Já o capítulo 7 aborda, mais em profundidade, o funcionamento do ondulador, começando pelo comando e princípio de funcionamento, onde de seguida são demonstradas as vantagens e desvantagens deste tipo de comando. É apresentada ainda a análise do conteúdo harmónico para o tipo de funcionamento escolhido. Neste capítulo é também feita uma analogia deste ondulador com a máquina síncrona o que terá interesse depois na compreensão do trânsito de potência e suas variáveis.

O capítulo 8 analisa um dos elementos essenciais na interligação em estudo, os cabos a utilizar. São examinados os vários elementos que o compõem, como o condutor, materiais

isolantes, camadas semicondutoras, écrans metálicos, armaduras e bainhas exteriores. É ainda calculada a dimensão aproximada de 3 possíveis troços e 2 prováveis cenários.

No capítulo 9, é feita uma pequena simulação do equipamento em estudo, onde são retratadas as formas de onda da tensão e corrente nas diferentes fases da transmissão. Por fim, no capítulo 10 são feitos os resumos dos vários capítulos e conclusões gerais do trabalho feito. Na última secção deste capítulo são ainda descritas possíveis acções futuras para o melhoramento do estudo aqui realizado.

Em relação ao anexo A, são fornecidas figuras que descrevem o percurso dos cabos e a profundidade destes em cada ponto da ligação. A carta náutica presente também em anexo foi muito útil nestes cálculos.

Finalmente, o anexo B descreve de forma sucinta os principais pontos da Avaliação de Impacte Ambiental deste projecto, bem como, algumas definições importantes na sua compreensão.

2. Aspectos Importantes numa Rede Eléctrica Interligada

O funcionamento de uma rede eléctrica interligada baseia-se no princípio da regulação frequência-potência. Isto significa que, numa rede de tensão alternada, todas as centrais funcionam em paralelo, mantendo a frequência dentro dos limites previamente fixados, o que significa que, instantaneamente, se verifica a igualdade entre a potência consumida e potência fornecida.

2.1. Vantagens de uma Rede Interligada

2.1.1 Incremento na Qualidade de Energia

Uma possível interligação entre as três ilhas do Bloco Central dos Açores, iria trazer vários benefícios para os seus consumidores, essencialmente, na qualidade de energia por eles consumida. Para melhor se compreender este factor, convém analisar os indicadores de qualidade de energia fornecidos pela EDA¹, como os valores de TIEPI, SAIDI e SAIFI, além do número de interrupções, todos estes valores são anuais.

O Regulamento de Qualidade do Serviço (RQS) estabelece ainda 3 zonas de qualidade de serviço distintas: A, B e C definidas como:

Zona A – Cidades de Ponta Delgada, Angra do Heroísmo e Horta e localidades com mais de 25 mil clientes;

Zona B – localidades com um número de clientes compreendido entre 2 mil e quinhentos e 25 mil;

Zona C – os restantes locais.

Em relação ao número de interrupções, os dados analisados serão os de 2006. As indisponibilidades afectaram cada ilha da Região de forma e em número distinto, verificando-se uma concentração de interrupções nos 1º e 4º trimestres, situação que é devida à maior incidência de intempéries nestes períodos, correspondendo a 59%² das interrupções do ano, a tabela seguinte demonstra isso mesmo.

¹ Electricidade dos Açores

² Segundo Relatório de Qualidade de Serviço da EDA, 2006.

Tabela 2.1 – Número Mensal de interrupções por ilha [EDA_RQS].

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total
S. Jorge	2	1	12	5	5	2	7	11	10	4	18	3	80
Pico	4	5	12	4	16	13	10	7	20	19	9	12	136
Faial	5	5	14	13	18	9	12	8	8	27	11	16	146

As indisponibilidades podem ter diversas classificações, desde as correspondentes a razões de serviço e de origem interna ao sistema eléctrico, tais como a construção de novos empreendimentos, reparação de equipamentos, conservação de equipamentos, alterações de configuração de rede ou trabalhos de abate ou decote de árvores.

Tabela 2.2 – Interrupções em 2006, por ilha [EDA_RQS].

	Interrupções Curtas	Interrupções Longas	TOTAL	Interrupções com origem no Sistema Electroprodutor	Interrupções com origem na Rede de Transporte
S. Jorge	17	63	80	7	73
Pico	3	133	136	39	97
Faial	38	108	146	43	103

A tabela anterior distingue as interrupções longas das interrupções curtas, de acordo com o estabelecido pelo RQS, ou seja, com tempos superiores a 3 minutos e com tempos menores ou iguais a 3 minutos. Também se constata, que uma parte significativa das interrupções tem origem na produção. Estas seriam minimizadas com a interligação das ilhas, pois existiriam mais Centros Produtores para compensar possíveis reduções na geração.

A qualidade de serviço, no que diz respeito à continuidade do fornecimento de energia, é quantificada através de indicadores. O indicador **TIEPI**, tempo de interrupção equivalente da potência instalada, fornece indicação da duração da interrupção em relação à potência instalada nos postos de transformação (PT) de serviço público e particulares, equivalente à totalidade das interrupções registadas na rede de distribuição de MT. O **SAIDI** é o indicador geral de qualidade de serviço que permite avaliar a duração média das interrupções nas redes de distribuição de MT ou BT, atendendo, respectivamente, à duração total das interrupções verificadas e ao número total de pontos de entrega. O **SAIFI** é o indicador geral de qualidade de serviço que permite avaliar a frequência média de ocorrência de interrupções na rede de distribuição de MT ou BT atendendo, respectivamente, ao número total de interrupções verificadas e ao número total de pontos de entrega em MT ou BT.

Existem outros indicadores para além dos três anteriores, mas a legislação em vigor, confere maior importância aos indicadores a nível de Média Tensão, pelo que são há mais tempo monitorizados pela EDA.

Segundo o artigo 5º do RQS, os indicadores para as redes de distribuição em média tensão e baixa tensão, já descritos anteriormente, apenas têm em conta as interrupções longas e não abrangidas pelo nº 1 do artigo 13º ¹.

Tabela 2.3 – Valores limite para os indicadores de qualidade de energia [RQS].

Indicadores	Tensão	Zonas Geográficas	Valores máximos por ilha
TIEPI (horas)	MT	A	3
		B	8
		C	26
SAIFI (número)	MT	A	4
		B	8
		C	12
	BT	A	4
		B	9
		C	13
SAIDI (horas)	MT	A	3
		B	8
		C	20
	BT	A	6
		B	12
		C	24

Os valores acima referenciados são os valores padrão impostos pela legislação, artigo 15º do RQS, dadas as circunstâncias especiais das ilhas dos Açores. No caso de Portugal Continental, estes valores são menores, devido à maior dimensão da rede energética.

Tabela 2.4 – Valores dos indicadores por ilha, Média Tensão [EDA_RQS].

	Zona de Serviço	Indicador	Valor	Padrão
S. Jorge	C	TIEPI	7	26
		SAIFI	9,1	12
		SAIDI	7	20
Pico	C	TIEPI	8	26

¹ nº1 do artigo 13º do RQS: O fornecimento de energia eléctrica, bem como a prestação do serviço de transporte e distribuição, podem ser interrompidos por: casos fortuitos ou de força maior; razões de interesse público; razões de serviço; razões de segurança; acordo com o cliente e facto imputável ao cliente.

		SAIFI	6,5	12
		SAIDI	8	20
Faial	A	TIEPI	1	3
		SAIFI	2,2	4
		SAIDI	1	3
	C	TIEPI	2	26
		SAIFI	9,2	12
		SAIDI	6	20

Na análise da tabela anterior certifica-se que nenhum indicador é ultrapassado, apesar do indicador SAIFI estar mais próximo do limite, nas três ilhas. Outro factor que abona esta aprovação, é a dilatação dos valores dos indicadores, dado que a legislação confere às ilhas dos Açores, um estatuto especial, devido às condições técnicas associadas à actual composição e estrutura topológica das redes eléctricas e aos sistemas eléctricos isolados de cada ilha com fragilidades intrínsecas. Todos estes indicadores seriam excedidos, se os critérios de qualidade fossem iguais aos de Portugal Continental.

Segundo dados fornecidos pela EDA no seu Relatório de Qualidade de Serviço de 2006, verifica-se que as interrupções com origem na produção têm um peso (cerca de 25,5%) no valor do TIEPI. Esta situação reflecte a severidade destas indisponibilidades, no que diz respeito ao número de pontos de entrega afectados e à duração das mesmas.

Quanto à origem das indisponibilidades, a produção tem um peso no SAIFI que varia aproximadamente 43,9%, em todo o Arquipélago, para zonas do tipo A, o que demonstra a abrangência das indisponibilidades com origem nos sistemas electroprodutores, pois normalmente representam cortes gerais.

As indisponibilidades com origem nas redes de transporte e distribuição têm uma influência de 69,6% no valor global deste indicador SAIDI. O elevado peso das indisponibilidades com origem na produção (30,4%) neste indicador, é demonstrativo do elevado número de pontos de entrega que estas afectam e/ou de uma duração significativa das mesmas.

A influência negativa da produção nos indicadores de qualidade do Arquipélago está bem demonstrada, e é razoável a sua extrapolação para as três ilhas em estudo. Mais uma vez se salienta o acréscimo de qualidade que se verificava, se a rede das três ilhas fosse interligada.

2.1.2 Vantagens Intrínsecas da Interligação

As características específicas de pequenos sistemas de energia, aliadas à pequena dimensão das redes, criam dificuldades do ponto de vista técnico e humano em manter elevados níveis de qualidade de serviço. A pequena dimensão das redes tem como consequência a fraca capacidade destas absorverem os defeitos que surgem, ou as afectam. Pelo que se verificam outras vantagens em ligar entre si estes três pequenos sistemas de energia, tais como:

- Reduzir o investimento em centrais de reserva de produção.
- Conseguir maior segurança no que se planifica.
- Resolver, muitas vezes, pontas dos diagramas de carga.
- Estabilidade da frequência.
- Adiamento do investimento em novas unidades geradoras e investimento em maiores unidades geradoras.
- Aproveitar, com mútuo interesse, as diferenças de custos de produção, nomeadamente, nos combustíveis fósseis.

Em relação à redução do investimento em centrais de reserva, há a salientar as ampliações recentes nas três centrais térmicas analisadas no Capítulo 3, que foram contabilizadas no Relatório de Contas da EDA de 2005 de 09/08/2006. A soma dos investimentos ronda os 9,5 Milhões de euros, assim discriminados.

- Ampliação da Central Termoeléctrica do Caminho Novo, S. Jorge, com a ampliação da sala de máquina e o fornecimento de um grupo de 1,5 MW (Grupo X) – 1.433.396€.
- Ampliação da Central Termoeléctrica do Pico, com a ampliação da sala de máquinas e o fornecimento de um grupo de 3 MW (Grupo VI) – 6.601.336€.
- Ampliação da Central Termoeléctrica de Santa Barbara no Faial, com a instalação de um grupo de 4,5MW – 1.695.923€.

Com a interligação em estudo estes investimentos seriam reduzidos, senão mesmo dispensáveis, já que em todas as ilhas existem grupos geradores de reserva devido às pontas de consumo e avarias. Com a interligação, os geradores de reserva seriam comuns, o que conduziria à sua diminuição, por outro lado, o seu uso iria aumentar, uma vez iriam servir as três ilhas, o que implicaria o acréscimo da sua rentabilidade.

2.2. Aspectos a Analisar no Projecto

Este tipo de projecto requer a análise de várias questões, entre elas, o factor custo motivador, o grande consumidor (neste caso o doméstico) e o acesso à energia e, por fim, a evolução das características de ligação. Mas a sua decisão é determinada principalmente por aspectos económicos, envolvendo análises de custo-benefício.

O fortalecimento da interligação estudada consiste, em primeiro lugar, na construção de novas linhas de transporte de energia e num aumento de capacidade de curto-circuito dos equipamentos principais das subestações existentes, principalmente na área da interligação. Como será discutido mais à frente, este indício não será relevante tendo em conta a natureza da ligação.

Há, no caso em estudo, a existência de condicionamentos técnicos especiais, que determinam a necessidade de recorrer a uma solução de características específicas. Haverá assim, aspectos a considerar na concepção, implementação e funcionamento deste tipo de interligação:

- O primeiro ponto de ligação do futuro sistema à rede de cada ilha deverá ser localizado, de preferência, na região de maior densidade eléctrica da mesma rede (centro de gravidade das cargas), pelo menos quando se prevê que predomina a injeção da energia.
- Esse sistema de interligação deverá ter características que possam minimizar o impacte ambiental causado pela sua existência.
- Em termos de características eléctricas, comparado com as soluções consideradas equivalentes, deve assegurar as menores perdas no transporte da energia eléctrica e operativamente deve permitir a inversão e o controlo do fluxo da energia eléctrica nas condições mais favoráveis.
- O sistema de interligação proposto deverá minimizar os investimentos a realizar na rede eléctrica existente, nomeadamente os investimentos relativos à implementação de novas unidades de geração e também à recuperação ou desmobilização de unidades existentes.
- Pela sua importância convém referir, no que diz respeito à geração, o aspecto da geração de reserva. Com efeito, um objectivo prioritário será o de se utilizar da melhor maneira possível a existência na rede de cada ilha de um número significativo de unidades geradoras às quais é atribuída essa função.

O fluxo da energia eléctrica entre pequenos sistemas de energia, pode em muitos casos ser numa tendência natural, e o seu funcionamento deverá assentar nos seguintes princípios:

- Segurança do fornecimento;
- Protecção do ambiente;
- Reconhecimento das diferenças existentes entre os sistemas das ilhas em questão.

3. Situação Actual no Bloco Central dos Açores

3.1. Caracterização Populacional

O arquipélago dos Açores, situado no Atlântico nordeste, dotado de autonomia política e administrativa consubstanciada no Estatuto Político-Administrativo da Região Autónoma dos Açores. Os Açores integram a União Europeia com o estatuto de *região ultraperiférica* do território da União, conforme estabelecido no artigo 299.º-2 do Tratado da União Europeia.

Nas duas últimas décadas, a economia portuguesa em geral, apresentou uma assinalável dinâmica, com uma taxa de crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) superior à média da União Europeia (UE). Contudo, essa tendência de crescimento não permitiu evitar a manutenção do mais baixo valor do PIB per capita a nível da UE. De facto, o consumo energético em Portugal tem crescido mais rapidamente do que o PIB, conduzindo a um aumento da intensidade energética embora ainda seja o mais baixo da UE, como é representado no gráfico seguinte. Existem inúmeros factores que determinaram o consumo por habitante, tal como, preço da energia; clima; hábitos de consumos e comportamento da população; peso relativo dos outros sectores de actividade e nível global da actividade económica, medido pela riqueza do país.

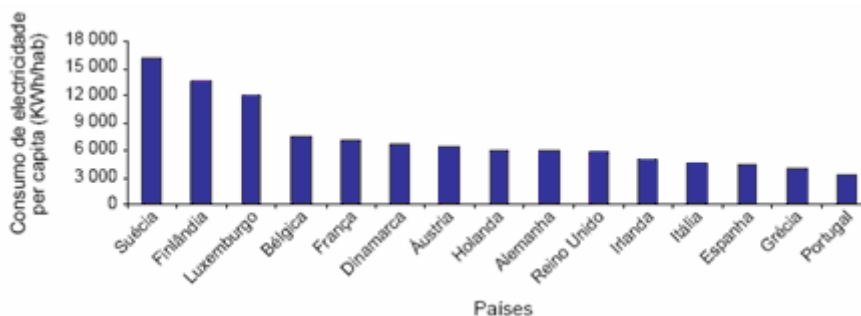


Figura 3.1 – Consumo de electricidade per capita nos Estados-membros da UE em 1996 (Fonte: EUROPROG Report, 1996)

Analisando o consumo per capita entre Portugal e Espanha facilmente se constata, através do gráfico seguinte, que este é menor em Portugal, o que é explicado, pelo melhor nível de vida de Espanha que se reflecte nos consumos de electricidade.

Em relação ao crescimento dos consumos entre 1995 e 2005, este tem sido mais ou menos constante em ambos os países. Nas ilhas do Bloco Central dos Açores o crescimento, cerca de 8% [EDA], é superior ao de Portugal Continental que se situa aproximadamente nos

5% [REN]. Este facto pode ser explicado pelo maior crescimento do nível de vida e pelos investimentos feitos em todo o Arquipélago dos Açores. Como se sabe, o actual Governo tem tomado medidas que favorecem estas condições, com vista a equilibrar o nível de vida com o da Região Autónoma da Madeira.

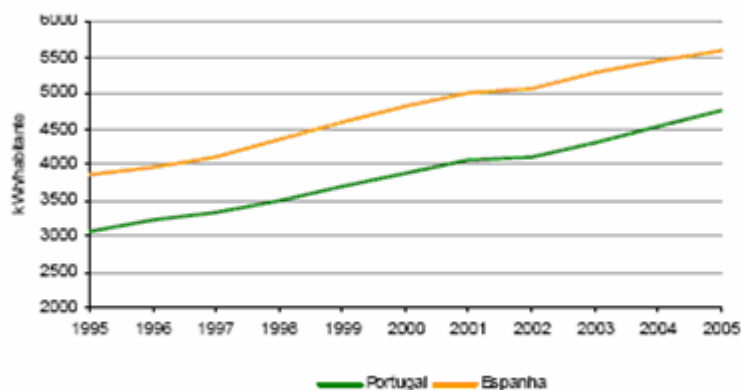


Figura 3.2 – Evolução do consumo de electricidade per capita em Portugal Continental e Espanha Peninsular. Período 1995 – 2005. [REN]

O crescimento do número de clientes da EDA em todo o Arquipélago, é um bom indicador do crescimento do consumo nas ilhas em questão. Assim se percebe a necessidade de reforçar a curto prazo o centro produtor. Tal pode ser minimizado com a interligação em questão, como já foi referido no Capítulo anterior e será reiterado no Capítulo 3.

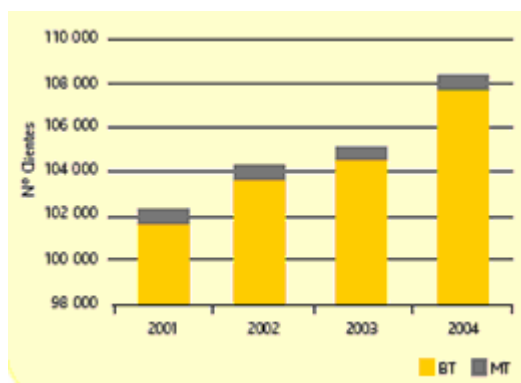


Figura 3.3 – Evolução do número de clientes EDA [RARI_EDA_2005].

A análise detalhada das características de consumo das ilhas, nomeadamente do tipo de consumidores e seu crescimento, será importante para compreender a evolução dos clientes de electricidade das ilhas em estudo, bem como das suas necessidades futuras, dimensionando assim correctamente os valores de potência a transitar, o que evitará possíveis reforços no equipamento a instalar.

Tabela 3.1 – Características das ilhas em estudo, valores de 2005 [RARI_EDA_2005].

		São Jorge	Pico	Faial
Superfície	(km ²)	245,6	450,7	169,9
População Residente	(habitantes)	9 674	14 806	15 063
Nº Instalações MT		19	35	41
Nº Instalações BT		5 383	8 272	7 204
<hr/>				
<u>Consumos</u>	(MWh)	22 257	34 125	42 991
Domésticos		9 488	14 553	15 490
Comércio/Serviços		5 365	8 391	13 189
Serviços Públicos		983	2 203	5 778
Industriais		4 719	6 549	6 354
Iluminação Pública		1 702	2 429	2 181
<hr/>				
<u>Produção</u>	(MWh)	25 060	39 783	50 407
Térmica a Fuel			36 417	45 682
Térmica a Gasóleo		22 434	5	1 393
Hídrica				423
Eólica		2 625	3 361	2 908
<hr/>				
Perdas	(MWh)	2 803	5 658	7 416
<hr/>				
Ponta	(kW)	4 305	7 014	8 716
Volume de Vendas	(euros)	2 566 067	3 991 912	4 985 182
Potência Instalada em Centrais	(kW)	8 230	11 810	17 825
Redes de Transporte e Distribuição (MT)	(km)	116	197	105
Potência em Posto de Transformação	(KVA)	12 366	25 815	25 836

O consumo de energia eléctrica na ilha de S. Jorge em 2005 ultrapassou os 22GWh e em 2004 teve um crescimento de 8,4% relativamente ao ano transacto, atingindo os 21 GWh. Este consumo representa 3,3% do consumo total da Região. O consumo do tipo doméstico é responsável por 42,63% do total, seguido do comércio e serviços (incluindo serviços públicos) com 24,1%. O número de clientes na ilha de S. Jorge aumentou relativamente ao ano anterior 1,3%, atingindo os 5 402 clientes, sendo 19 de média tensão e os 5 383 restantes de baixa tensão. O consumo médio dos clientes de MT foi, em 2004, de 193 110 kWh/ano, sendo para os clientes de BT de 3 258 kWh/ano.

O consumo de energia eléctrica na ilha do Pico, no ano de 2005, atingiu os 34 GWh, já em 2004 assinalou um crescimento de 8,8% em relação ao ano de 2003. Este valor representa 5,4% do consumo total da Região. A estrutura do consumo é dominada pelos consumos domésticos, com 42,64%, seguida pelo comércio e serviços (incluindo serviços públicos), com 24,59% do consumo total. A ilha do Pico atingiu, em 2005, os 8307 clientes, dos quais 35 em

média tensão e 8 272 em baixa tensão. O consumo médio de energia dos clientes de MT atingiu os 171 953 kWh, sendo para os clientes de BT de 3 394 kWh.

Em 2005, o consumo da ilha do Faial foi de aproximadamente 43 GWh. Este valor representa 6,6% do consumo total da Região. A estrutura do consumo é dominada pelos consumos domésticos, com 36,03%, seguida pelo comércio e serviços (incluindo serviços públicos), com 30,67% do consumo total. No final de 2005 na ilha do Faial existiam 7204 clientes de baixa tensão e 41 clientes de média tensão. No ano em análise, os clientes MT tiveram um consumo médio de 312 650 kWh/ano e os clientes de baixa tensão um consumo médio de 3 856 kWh/ano.

3.2. Centrais Térmicas Existentes

As ilhas em estudo não têm exploração geotérmica, ao contrário da ilha de S. Miguel; apesar do potencial deste tipo de produção eléctrica no Arquipélago dos Açores não há projectos deste tipo a curto/médio prazo nas ilhas em questão. Em relação aos recursos eólicos, estes representam 14% da produção eléctrica de S. Jorge (Parque Eólico do Pico da Urze) e 6% da ilha do Faial (Parque Eólico de Lomba dos Frades). A produção hídrica nas três ilhas é praticamente nula, já que, corresponde a 1% da produção no Faial, segundo fonte da EDA no ano de 2005.

A esmagadora maioria da produção eléctrica tem origem nos combustíveis fósseis, gasóleo e fuelóleo, aproximadamente 93% da produção total das três ilhas em estudo, daí a grande importância do estudo e análise destas centrais. A interligação em estudo teria grande impacto nos custos destas centrais, como será observado no Capítulo 4. De seguida, são referidas as características técnicas das centrais térmicas das três ilhas, importantes para a sua análise.

Ilha do Pico: Central do Pico (Localização S. Roque)

Tabela 3.2 – Características técnicas dos grupos gerador/motor presentes na Central do Pico.

Características Gerais



Entrada ao serviço				1990
Potência Total Instalada (kW)				10 010
Número de Grupos				5
Combustível	Fuelóleo			
	Grupo 1 a 3	Grupo 4	Grupo 5	
Gerador	AVK DIDBN 150/145M710	AVK DIG 156 M-10	RELIANCE SDGB 5602-8	
Motor	KRUPP MAK 6M453C	Caterpillar/MAK 6CM 32C	KRUPP MAK 8M332	
Potencia Nominal (kW)	2000	2778	1232	
Consumo especifico (gr/kWh)				
100%	215	213	215	
75%	220	217	220	
50%	231	228	231	
Sistema arranque de Tensão de geração (kV)	Ar comprimido 6	Ar comprimido 6,6	Ar comprimido 0,4	
Arrefecimento alternador	Ar	Ar	Ar	
Compensação síncrona	Sim	Sim	Sim	

Ilha São Jorge: Central do Caminho Novo (Localização Caminho Novo, Urzelina)

Tabela 3.3 – Características técnicas dos grupos gerador/motor presentes na Central do Caminho Novo.

Características Gerais



Entrada ao serviço			1984
Potência Total Instalada (kW)			6000
Número de Grupos			6
Combustível	Diesel		
	Grupo 4 e 5	Grupo 6, 7, 8 e 9	
Gerador	ANSALDO-MX 500AH6	CATERPILLAR SR4-3516	
Motor	MIRRLISS ESL6MK2	CATERPILLAR 3516	
Potencia Nominal (kW)	940	1030	

Consumo específico (gr/kWh)	245	245
Sistema arranque	Ar comprimido	Ar comprimido
Tensão de geração (kV)	0,4	0,4
Arrefecimento alternador	Ar	Ar
Compensação síncrona	Sim	Sim

Ilha Faial: Central de Santa Bárbara (Localização Angústias)

Tabela 3.4 – Características técnicas dos grupos gerador/motor presentes na Central de Santa Bárbara.

Características Gerais



Entrada ao serviço					1982
Potência Total Instalada (kW)					15 705
Número de Grupos					6
Combustível	Diesel	Fuelóleo	Fuelóleo	Fuelóleo	Fuelóleo
	Grupo 1 e 2	Grupo 3 e 4	Grupo 5	Grupo 6	
Gerador	BRUSH-BSM 100-66	CEM-WAPD 113108/12	AVK DIDBN 150/145M/10	AVK DIG 155 Q-10	
Motor	RUSTON 16RKC	CCM SULKER 6ZL40/48	KRUPP MAK 6M453C	Caterpillar/MA K 8CM 32C	
Potencia Nominal (kW)	2000	3000	2000	3705	
Consumo específico (gr/kWh)					
100%	245	213	215	213	
75%		217	220	217	
50%		228	231	228	
Sistema arranque	Ar comprimido	Ar comprimido	Ar comprimido	Ar comprimido	
Tensão de geração (kV)	6,6	III-10; IV-6,6	6	6,6	
Arrefecimento alternador	Ar	Ar	Ar	Ar	
Compensação síncrona	Sim	Sim	Sim	Sim	

4. Custos nas Centrais em Análise

O custo total de um centro electroprodutor, é constituído por duas parcelas essenciais:

$$C_F + C_V$$

O Custo Fixo, C_F , representa o encargo fixo, tal como, a amortização e remuneração do investimento, recursos humanos, seguros, taxas camarárias, despesas de manutenção das centrais, entre outros. O Custo Variável, C_V , caracteriza o encargo variável, isto é, o custo do combustível consumido na produção de energia eléctrica.

4.1. Variação do Custo Variável

Na análise do custo variável, isto é, dos combustíveis, há necessidade de saber o valor da potência instalada em cada ilha e o tipo de combustíveis usados, características já referidas no Capítulo anterior.

Tabela 4.1 – Potência instalada em cada ilha, referente a 2005 (valores em kW) [RARI_EDA_2005].

	Pico	Faial	São Jorge
Potência Instalada (Fuelóleo)	10 010	11 705	-----
Potência Instalada (Diesel)	-----	4 000	6000
Hídrica/Eólica	1800	2 120	2 230
Total	11 810	17 825	8 230
<hr/>			
Ponta (kW)	7 014	8 716	4 305

O encargo variável é determinado pelo preço dos combustíveis no mercado internacional; assim, esta parcela é condicionada, no tempo, pela evolução do mercado dos combustíveis. Como se pode constatar na Tabela 4.1, a maior parte da geração tem origem no gasóleo e fuelóleo, pelo que o seu preço é de extrema importância para determinar o custo da energia eléctrica. Seguidamente, são dados os valores do fuelóleo e diesel em euros por tonelada.

Tabela 4.2 – Custo dos combustíveis fósseis [ERSE].

	Fuelóleo	Diesel
Custo	221 €/t	297 €/kl => 334.46 €/t

Massa volúmica do diesel a 15°C [kg/m³] = 888

Outro factor essencial para se determinar o custo variável, é o consumo médio dos motores dos grupos geradores, que varia conforme o grupo e tipo de combustível. A tabela seguinte traduz o consumo, em g/kWh e €/MWh, de um motor a fuelóleo em relação ao diesel.

Tabela 4.3 – Consumo médio dos motores existentes em cada Ilha [RARI_EDA_2005].

	Combustível	Consumo (g/kWh)	Consumo (€/MWh)
Pico	Fuelóleo	205	45,305
	Diesel	245	81,94
Faial	Fuelóleo	220	48,62
	Diesel	245	81,94
São Jorge	Diesel	273	91,3

A tabela anterior evidencia de forma clara o elevado consumo do motor a diesel; e o seu custo em €/MWh é o dobro do a fuelóleo. O motor a fuelóleo é, portanto, muito mais eficiente.

Depois de conhecidas as variáveis anteriores, é essencial conhecer a totalidade da energia produzida durante um ano, neste caso 2005, para no fim se obter o custo em combustíveis do ano em referência. A origem da energia produzida em 2005 será proporcional à potência instalada. A maior parte da energia provém do fuelóleo, excepto em São Jorge que só tem grupos a diesel.

Tabela 4.4 – Produção eléctrica anual em cada ilha [RARI_EDA_2005].

Produção (MWh)	Pico	Faial	São Jorge
Térmica a Fuelóleo	36 417	45 682	-----
Térmica a Diesel	5	1 393	22 434
Hídrica/Eólica	3 361	3 331	2 625
Total por ilha	39 783	50 407	25 060
Total nas 3 ilhas		115 250	

O custo variável em 2005, é o produto do consumo pelo custo dos combustíveis e pela energia produzida, que resulta nos valores da tabela seguinte. De salientar, que a ilha do Pico é a menos onerosa apesar de ter mais produção que São Jorge, o que se explica pelo combustível usado. A ilha do Faial é a mais dispendiosa devido à maior produção.

Tabela 4.5 – Custo variável em cada ilha, ano de 2005.

Custo de Produção (Milhões de euros)	Pico	Faial	São Jorge
Térmica a Fuelóleo	1,65	2,22	----
Térmica a Diesel	0,000411	0,114	2,05
Total por ilha	1,65	2,34	2,05
Total nas 3 ilhas		6,034	

A produção térmica com origem no diesel é muito dispendiosa. Assim, pode haver ganhos significativos se se diminuir a sua utilização. No cenário da interligação da rede destas três ilhas, a produção térmica a diesel pode ser retirada e compensá-la na produção térmica a fuelóleo, o que implicaria ganhos expressivos. Os 23 832 MWh resultantes da produção a diesel serão igualmente distribuídos pelas duas centrais a fuelóleo das ilhas do Faial e Pico. Ter-se-ia então os seguintes custos variáveis:

Tabela 4.6 – Novo custo variável em cada ilha, ano de 2005.

Custo de Produção (Milhões de euros)	Pico	Faial	São Jorge
Térmica a Fuelóleo	2,15828	2,83416	-----
Total nas 3 ilhas		4,99244	

Comparando os dois encargos facilmente se conclui que só no ano de 2005 **poupar-se-ia 1,04144 milhões de euros (-17%)** em combustíveis; a interligação teria assim um grande impacto neste custo.

4.2. Variação do Custo Fixo

Neste capítulo, estuda-se a variação do custo fixo, com a ligação das três ilhas em questão. Assim, há que ter em conta o valor inicial (I_{ini}) e residual (I_{res}) do investimento, neste caso, o valor residual não será considerado, tendo em conta as características da central. O preço do custo fixo é estabelecido pela seguinte equação:

$$C_F = \frac{I_{ini} - I_{res}}{n} + \left(I_{ini} - j \frac{I_{ini} - I_{res}}{n} \right) r$$

Equação 4.1

O número de anos de amortização do investimento (n) pode variar de 20 a 30 anos, será assumido **30 anos**. O factor (j) corresponde ao ano em consideração, variará de 0 a n. Por fim, a taxa de remuneração do capital (r) será baseada no valor de 11%, que resulta dos 8,5% de juro mais 2,5% de taxa de inflação.

Neste estudo, a produção térmica a diesel seria dispensável, como tal, os grupos alimentados por este combustível, representam um encargo desnecessário. Com base nos dados divulgados pela EDA, obtêm-se os seguintes valores:

Tabela 4.7 – Quadro resumo dos custos fixos.

	Ilha de São Jorge	Ilha do Faial	Ilha do Pico
Número de grupos a diesel	9	2	0
Custo médio de cada grupo diesel (valor considerado)	300.000€ ⁴		--
I _{ini} (€)	3.240.000€	600.000€	--
factor j	23 (Entrada ao serviço em 1984)	26 (Entrada ao serviço em 1982)	--
C _F (€)	191.160	28.800	0
Somatório (€)		219.960	

O custo inicial da central da Ilha S. Jorge será o valor dos seus 9 grupos diesel, acrescido de 20%, porque há que ter em conta a construção da central e seus equipamentos. Porém na Ilha do Faial, o custo inicial considerado será o dos grupos diesel, uma vez que, apenas estes importam para o estudo. Desta central fazem parte dois grupos diesel e quatro a fuelóleo.

Feitas as contas em 2005, os custos fixos da produção térmica a diesel, foram de aproximadamente 220.000€. Além deste valor, há a acrescer os dispendidos com recursos humanos, seguros, taxas camarárias e despesas de manutenção na central térmica da Ilha de S. Jorge.

A interligação das ilhas, presentemente não iria alterar este encargo, pois o investimento foi feito no passado. Mas deste modo, tem-se uma noção dos encargos

⁴ Trata-se de um valor aproximado, depois de consultar algumas empresas que vendem tais equipamentos. Referências:
<http://www.dieselserviceandsupply.com/Used-Generators/Katolight-2000-11286.aspx>
<http://www.peakpowertools.com/Diesel-Generator-Cummins-2000-kW-Electric-Gen-Set-p/gtr558023.htm>

fixos inerentes a este tipo de produção. Por outro lado, fica a ideia de quanto se economizaria só em 2005, se a interligação fosse feita no início da exploração.

4.3. Valor da Energia Não Fornecida

A energia não fornecida (ENF), consta no relatório de Caracterização das Redes de Transporte e Distribuição da EDA, os dados retirados correspondem ao ano de 2006 e revelam valores consideráveis, na ordem das várias dezenas de MWh. Para o caso aqui em estudo apenas serão considerados os valores que têm origem no sistema de transporte e produção. A energia não fornecida motivada pela distribuição, depende de variáveis que ultrapassam o âmbito deste trabalho.

Tabela 4.8 – Energia não fornecida no ano de 2006 [EDA].

	Energia Não Fornecida (MWh)			
	Acidentalmente		Prevista	
	Produção	Transporte	Produção	Transporte
São Jorge	1,55	0	8,09	0
Pico	68,6	18,96	15,14	0
Faial	41,63	0	0,01	0
Total				153,98

O custo médio da energia, fazendo uma média ponderada das várias tarifas, situa-se nos 0,14185€/kWh. Ao multiplicar este custo pela energia não fornecida, determina-se 22.000 € valor que deixou de ser facturado pela EDA, considerando só as interrupções longas. Custo que poderia ser consideravelmente diminuído com a interligação das três ilhas.

Este cálculo financeiro foi efectuado tendo por base o ponto de vista da empresa fornecedora de energia. No entanto, a valorização dessa energia não fornecida ao nível dos consumidores, seria pelo menos 10 vezes superior. Veja-se por exemplo, o impacto de uma interrupção no período de laboração de uma fábrica, os custos associados a essa falha podem ser avultados.

5. Análise da Potência a Transitar

A análise dos valores de ponta máxima e vazio do consumo de energia eléctrica de cada ilha será importante para o correcto dimensionamento do equipamento a instalar na ligação das três ilhas, nomeadamente a potência de ponta máxima.

Nas figuras seguintes representam-se os valores de ponta máxima e vazio ocorridos em cada mês do ano de 2005. Estes referem-se à potência atingida pelo sistema produtor. Cada gráfico retrata especificamente uma ilha.

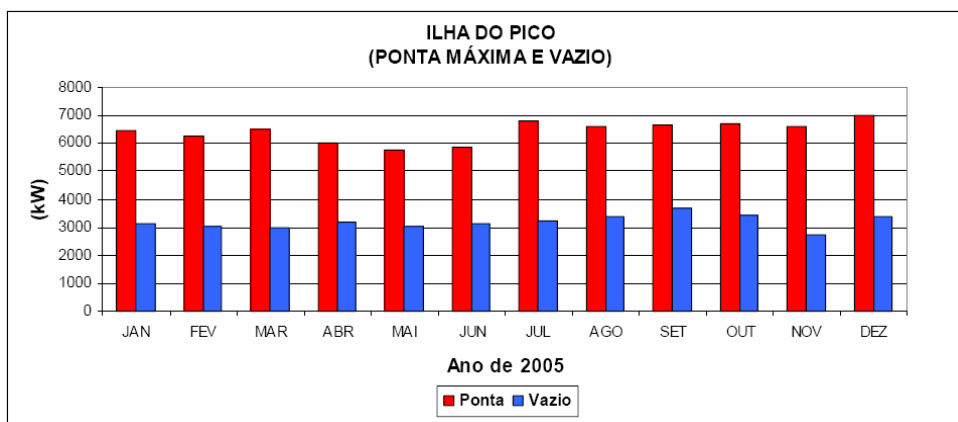


Figura 5.1 – Ilha do Pico, valores de Ponta e Vazio [RARI_EDA_2005].

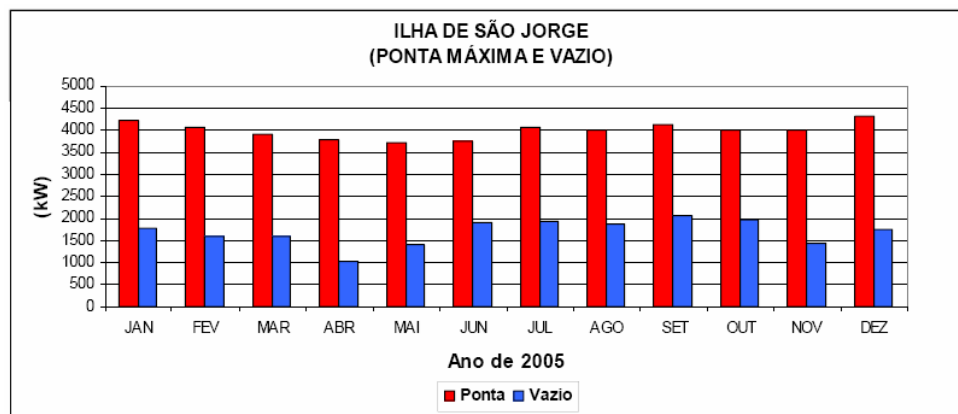


Figura 5.2 – Ilha de São Jorge, valores de Ponta e Vazio [RARI_EDA_2005].

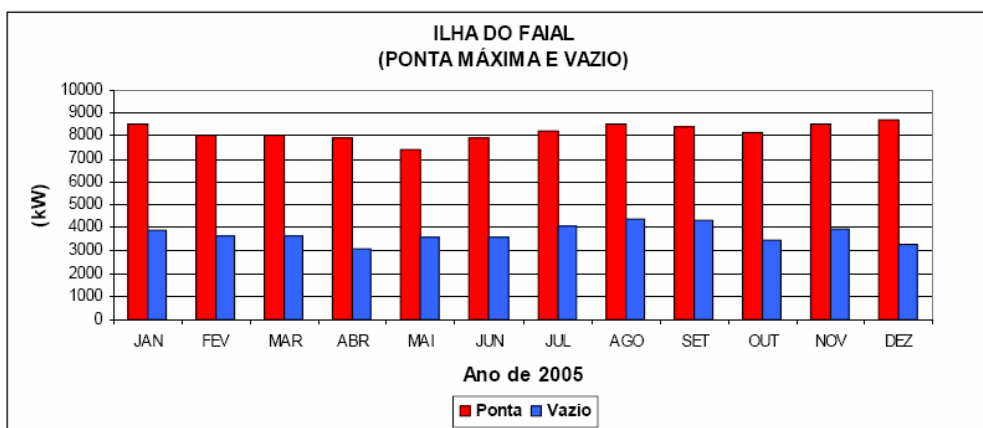


Figura 5.3 – Ilha do Faial, valores de Ponta e Vazio [RARI_EDA_2005].

Depois de analisados os gráficos, há a assinalar o vazio mínimo na ilha de São Jorge, que se verificou em Abril, este valor ronda 1 MW. Curiosamente, na ilha do Faial o vazio também acontece em Abril, cerca de 3 MW. Na ilha do Pico todos os vazios têm valores próximos mas o mesmo não ocorre nas outras duas ilhas.

Na ilha do Pico a ponta máxima foi perto dos 7,014 MW e o vazio mínimo foi aproximadamente 2,8 MW. Na ilha de São Jorge a ponta máxima foi cerca de 4,305 MW, enquanto que, na ilha do Faial a ponta máxima foram os referidos 8,716 MW. De realçar que, na ilha de São Jorge o seu valor de pico corresponde a metade do verificado nas outras duas ilhas analisadas, o que pode ser explicado pelo menor número de habitantes.

Uma outra análise importante será a taxa de crescimento das ilhas, porque o equipamento instalado terá de estar preparado para suportar valores de potência superiores aos apresentados. A vida útil dos diversos componentes que permitem a interligação estudada, situa-se entre os 30 a 40 anos. Apesar deste valor elevado, a ligação será dimensionada para suportar um crescimento do consumo nos próximos 10 anos. Posto isto, analisar-se-á a taxa de crescimento de cada ilha.

A produção na **ilha do Pico**, em 2004, atingiu os 39 GWh, tendo aumentado **8,6%** em comparação com o ano de 2003. A produção nesta ilha foi exclusivamente de origem térmica.

A produção na **ilha de S. Jorge** no ano de 2004 alcançou os 24 GWh, tendo aumentado **6,5%** relativamente a 2003. A origem da produção é maioritariamente térmica a gasóleo, existindo cerca de 14% de energia com origem eólica.

A produção na **ilha do Faial** totalizou, em 2004, 48,3 GWh, aumentando em relação ao ano transacto **8,8%**. Esta ilha apresenta alguma diversidade na origem de produção de energia eléctrica, embora maioritariamente seja do tipo térmica a fuelóleo, que representou 91% da energia produzida. A energia eólica ascendeu a 5,6% e a energia com origem hídrica a 1%.

Tendo em conta os crescimentos descritos, considera-se que estes são constantes ao longo dos 10 anos seguintes. Aplicando-os no crescimento da potência de ponta máxima, a ilha do Pico registará daqui a 10 anos uma potência de ponta máxima perto dos 16 MW, a ilha de São Jorge a ponta máxima será cerca de 8 MW e por fim na ilha do Faial aproximadamente 20 MW. A fórmula usada nestes cálculos foi a seguinte.

$$Ponta_{futuro} = Ponta_{presente} (1 + taxa_de_crescimento)^{número_de_anos}$$

Equação 5.1

Os valores anteriores serão muito importantes para o dimensionamento do equipamento a utilizar, na interligação estudada. Por outro lado, será também importante conhecer o nível de tensão das linhas onde as ligações são feitas. Este valor em S. Jorge e Faial é de 15 kV, enquanto que na ilha do Pico varia entre 15 kV e 30 kV.

6. Ligação em Corrente Contínua

Numa ligação em corrente contínua existem uma série de factores a ter em conta, para o sucesso do transporte de energia, bem como para a optimização das perdas. Pode-se destacar, então, alguns pressupostos⁵:

1. Identificação das procuras do sistema alternado relativamente à sua estabilidade.
2. Escolher as variáveis de observação do sistema alternado que representarão os modos da oscilação electromagnética inerentes a um sistema deste tipo.
3. Escolher as variáveis de controlo no circuito contínuo que mais influenciam os modos de oscilação do sistema alternado.
4. Dimensionar os controladores que intervêm nas variáveis do circuito alternado e se possível as variáveis do circuito contínuo, que de certa forma influenciam a estabilidade no sistema alternado.

Depois de estudados estes propósitos, há que analisar outro aspecto muito importante, o tipo de ligação em corrente contínua. As aplicações em HVDC (High Voltage Direct Corrent), consistem essencialmente em três tipos:

- Ligação Monopolar, onde é usado apenas um condutor que opera normalmente com polaridade negativa, já que o efeito de coroa é substancialmente menor com este tipo de polaridade. Solução pouco utilizada.
- Ligação Bipolar, esta tem dois condutores em cada terminal, um positivo e outro negativo. Em operação normal, a intensidade de corrente em cada um dos pólos é igual, pelo que a corrente que flui pela terra é nula. No caso de indisponibilidade de um pólo, o outro pode operar com retorno pela terra, transportando metade da potência.
- Ligação Homopolar, esta também tem dois condutores mas com a mesma polaridade, usualmente negativa. Geralmente opera com retorno pela terra.

⁵ Fonte: Incorporating HVDC Power Transmission into System Planning, Division of Electric Energy Systems, United States Department of Energy, Phoenix – Arizona, 1980

No caso em estudo a opção recaiu na mais consensual, a **ligação bipolar**. A escolha desta é justificada em parte, pelo inconveniente que o retorno pela terra tem numa ligação DC, apesar da ligação homopolar não necessitar de tantos custos de isolamento.

A inversão do sentido do trânsito de potência é possível na configuração bipolar, o que se consegue através do controlo dos conversores. A grande maioria dos sistemas de transmissão de corrente contínua é do tipo bipolar, sendo a operação monopolar apenas permitida no caso de indisponibilidade de um dos pólos.

6.1. Principais Componentes

A figura 6.1 representa de forma simplificada os constituintes mais básicos que em conjunto com os onduladores farão a ligação entre as ilhas. A constituição dos dois extremos será muito semelhante, já que o trânsito de potência é bidireccional. A existência de filtros AC, filtros DC e transformadores será indispensável na transmissão de potência.

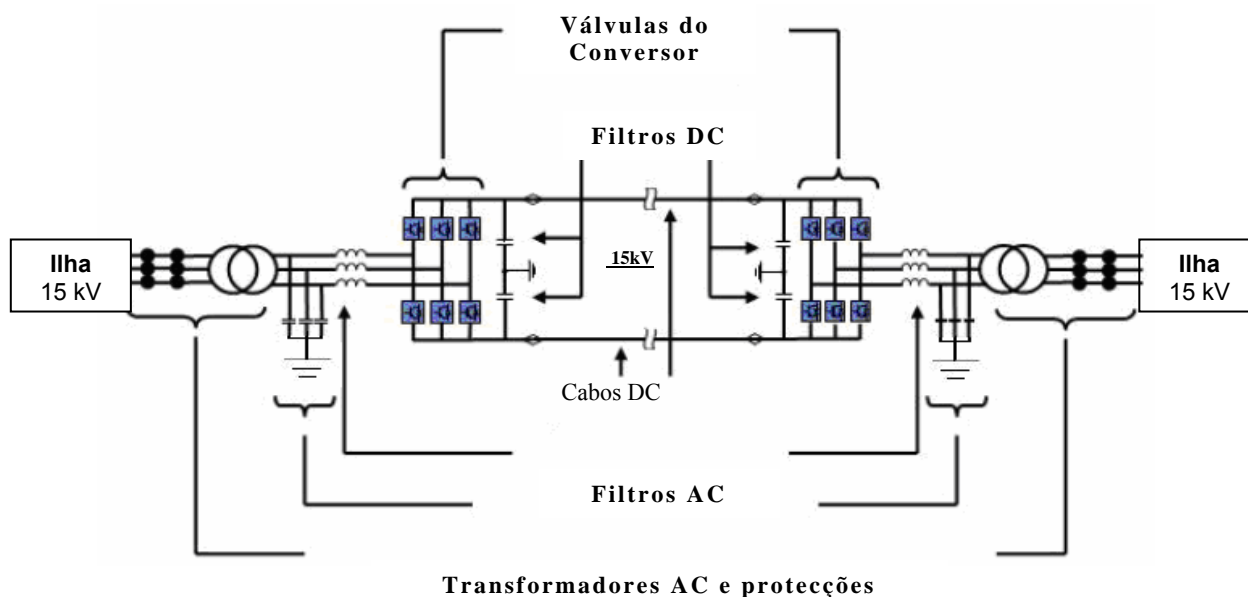


Figura 6.1 – Figura representativa dos principais elementos existentes numa ligação entre ilhas [ABB_HVDC].

6.1.1 Constituição dos Onduladores de Tensão

Os semicondutores de potência com tecnologia MOS-Bipolar, os Transistores Bipolares de Porta Isolada (IGBT) serão os mais indicados para o ondulator em estudo. Este semicondutor pode suportar uma tensão na ordem dos 3300V aliada a uma corrente de 1200A, valores muito altos que se adequam ao caso em estudo. A exigência de comando e comutação destes componentes no ondulator é muito baixa, em comparação com os outros semicondutores, como o GTO ou Tiristor.

A sua frequência de operação pode atingir 20kHz, valor muito superior aos 1000Hz que se considera razoável para o funcionamento do ondulator no caso em análise, o qual é caracterizado por uma potência relativamente elevada. A porta deste dispositivo tem alta impedância o que exige pouca energia nas suas comutações, por conseguinte, a comutação a alta frequência está aliada a baixas perdas. No entanto, deve ter-se em atenção que à medida que se sobe a potência dos componentes, a sua frequência de comutação é limitada.

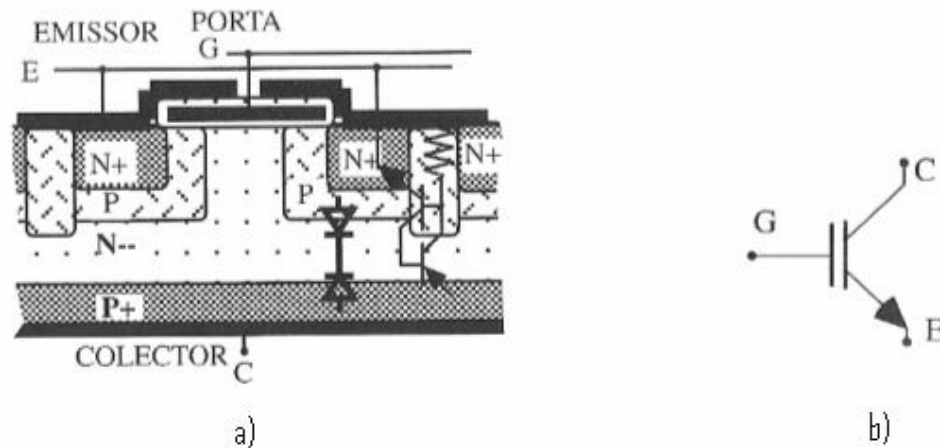


Figura 6.2 – a) estrutura do IGBT; b) Símbolo electrónico para o IGBT como um transistor bipolar de porta isolada.

O estado do dispositivo é ditado pela tensão Porta-Emissor v_{GE} , quando esta é inferior à tensão limiar de condução V_{GEth} o IGBT estará ao corte. As características $i_C = f(v_{CE}, v_{GE})$ são normalmente fornecidas pelos fabricantes, bem como os valores típicos da tensão de limiar V_{GEth} e da tensão V_{CEsat} . O seu funcionamento pode ser dividido em quatro regiões distintas:

- Região de Corte: $v_{GE} < V_{GEth}$, o dispositivo está ao corte não existindo portanto corrente no colector. A tensão v_{CE} é imposta por um circuito exterior e pode ser positiva ou negativa.
- Região Activa; $v_{GE} > V_{GEth}$ e $v_{CE} \gg V_{CEsat}$. A potência dissipada é muito elevada razão pela qual esta região não é usada em aplicações de potência razoável, devido ao baixo rendimento.

- c) Região de Saturação; $v_{GE} > V_{GEth}$ e $v_{CE} \approx V_{Cesat}$. A potência dissipada é menor que na região activa, pelo que esta zona juntamente com a de corte, são as únicas utilizadas em aplicações de potência.
- d) Região de Avalanche; $v_{GE} > V_{Geth}$, a tensão v_{CE} é muito elevada bem como a corrente i_C o que pode dar origem à destruição do IGBT.

Os limites da zona de funcionamento na condução, são determinadas a partir do valor de V_{GEth} (tensão limiar de condução) que traduz a tensão porta-emissor assegurando ainda $i_C \approx 0$ ou seja mantém o IGBT na região de corte; bem como a tensão V_{GEmax} que representa o máximo valor instantâneo da tensão na porta que não permite correntes suficientemente grandes que podem destruir o IGBT. Por fim, outro valor de referência é o valor médio máximo da corrente de colector, I_{CAV} .

O funcionamento na zona de corte é conseguido aplicando uma polarização inversa ($v_{GE} = -15V$) para adquirir uma maior área de funcionamento seguro, e maior imunidade a perturbações exteriores ou devidas a eventuais fenómenos eléctricos do IGBT, outra forma de alcançar este funcionamento consiste em manter a porta curto-circuitada com a fonte ($v_{GE} = 0$).

A potência média de perdas de condução na zona de saturação ou de comutação entre esta e a zona de corte, é quantificada pelas resistências térmicas e pela temperatura máxima permitida ao semiconductor. As duas principais referencias neste domínio são:

- Resistência térmica semiconductor – cápsula (R_{thj-c}). Valor que depende do tipo de encapsulamento do IGBT, a sua minimização engrandece os custos deste semiconductor.
- Resistência térmica cápsula – dissipador (R_{thc-s}). O tipo de dissipador usado e o modo de como este é adaptado à cápsula influi esta característica.

Os semicondutores durante o seu funcionamento podem atingir temperaturas muito elevadas o que torna necessário um sistema de refrigeração. Neste sistema é normalmente usada água, onde é importante a sua desionização para obter baixa condutividade. Um sistema de refrigeração com água oferece alta eficiência, segundo o Grupo ABB.

Em casos limite, os elevados níveis de tensão e corrente podem corresponder a potências dissipadas que originam temperaturas que levam à fusão do semiconductor. A disrupção do dieléctrico e a disrupção por avalanche são fenómenos que podem conduzir também à destruição deste dispositivo. As características dinâmicas e de protecção destes dispositivos não são aqui aprofundadas.

Em relação à arquitectura do ondulator, os seus semibraços serão compostos por um módulo e submódulos. Cada módulo é constituído por 3 submódulos em série e este composto

por 3 semicondutores em paralelo já especificados (IGBT 3300V/1200A). A disposição dos submódulos em série permite obter tensões elevadas e colocação dos semicondutores em paralelo possibilita a operação com correntes elevadas. A figura seguinte tenta clarificar esta situação.

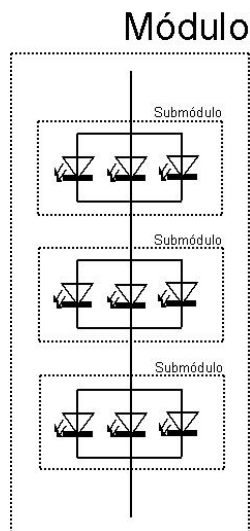


Figura 6.3 – Constituição de um módulo do ondulado.

Com um módulo deste tipo em cada semibraço do ondulado, este terá a capacidade suportar uma tensão máxima de 9900V e uma corrente de 3600A, valores que conduzem a uma potência na ordem dos 35MW, valor muito superior ao dimensionado no Capítulo 4.

Colocar semicondutores em série e paralelo é um problema delicado, mas fundamental numa montagem deste género. É importante que os IGBT entrem em condução no mesmo instante, para garantir a correcta distribuição da voltagem pelo módulo, bem como a divisão uniforme da corrente.

Existem cuidados a ter na montagem dos IGBT, como a utilização de circuitos de ataque de porta individuais de modo a conseguir tempos de comutação equilibrados e reduzidos ausentando também as oscilações parasitas. Estas podem ser evitadas montando em série com cada porta, uma resistência ou uma pequena indutância com núcleo de ferrite, se os tempos de comutação não forem críticos.

Os IGBT podem manifestar variações muito grandes no valor da tensão limiar de condução, o que pode prejudicar a sua associação em paralelo no caso em estudo. Assim, é importante a utilização de indutâncias em série, onde os IGBT são postos em condução e ao corte simultaneamente, com a divisão uniforme das correntes feita pelas bobines em questão. O uso destas indutâncias ligadas é útil, já que o aumento da corrente numa das componentes induz por ligação magnética tensões que tendem a restabelecer o equilíbrio. É uma solução

mais cara em relação ao uso de resistências de baixo valor em série, no entanto melhor ao nível das perdas.

A colocação de IGBT em série e paralelo depara ainda com o problema da existência de vários circuitos de comando que devem garantir a simultaneidade do disparo de todos os dispositivos. Outras precauções neste tipo de montagem assentam na disposição dos IGBT que deve ser simétrica em relação a pelo menos um eixo de simetria.

Serão usados dois onduladores em série, com o objectivo de obter do lado contínuo uma tensão na ordem dos 15 kV entre os dois condutores, como é próprio da ligação bipolar. Cada conversor é configurado a 6 pulsos, obtendo-se assim 12 pulsos. O esquema desta montagem está representado na figura 6.4.

6.1.2 Transformador

Os transformadores presentes no circuito, têm um papel de extrema importância para o bom funcionamento da ligação. Em primeiro lugar asseguram o isolamento galvânico entre o gerador e o conversor. Além disso, vão modificar o nível de tensão, para o pretendido na entrada do ondulador.

A utilização de um transformador permite igualmente, neste caso, criar seis fases na entrada do ondulador a partir das três fases do primário. Mas o seu funcionamento, vai acarretar dois tipos de perdas:

- *Perdas por Histerese*, como os materiais ferromagnéticos são passíveis de magnetização, quando se aplica um campo (como o gerado por um indutor ou o primário do transformador), este processo consome energia, e ao se aplicar um campo variável, o material tenta acompanhá-lo, o que contribui para o seu aquecimento.
- *Perdas por correntes parasitas ou de Foucault*, são devidas à condutividade do núcleo, que forma no caminho fechado do núcleo uma espira, que consome energia. Para minimizá-la, usam-se materiais de baixa condutividade, como a ferrite e chapas de aço-silício, isoladas umas das outras por verniz.
- *Perdas por efeito de Joule*, estas são causadas pelas resistências dos enrolamentos, sendo representadas por resistências. Em vazio, as perdas por efeito de Joule no circuito do primário, têm um valor relativo muito pequeno.

Como se observa na figura 6.4, o transformador terá no secundário dois enrolamentos, um em estrela e outro em triângulo. No lado contínuo, os dois onduladores de cada terminal, funcionam cada um a seis pulsos mas o seu comando deve apresentar entre si uma defasagem de 30° , para que se obtenha na tensão de saída um índice de pulsação de 12, esta defasagem é originada pelos enrolamentos do transformador.

No lado da rede, as ligações do secundário em estrela e triângulo, fazem com que a 5ª harmónica do enrolamento em estrela se anule com a 5ª harmónica do enrolamento em triângulo, o mesmo acontece com a 7ª harmónica, isto se os onduladores apresentarem o mesmo comando e o desfasamento de 30° .

No enrolamento do primário optou-se por uma ligação em estrela, mas de realçar que ligação em triângulo seria também uma opção igualmente credível, não havendo neste aspecto uma imposição técnica.

Como é do conhecimento comum, se o primário está ligado em estrela e o secundário em triângulo, as correntes de fase primárias são isomorfas das correntes de fase secundárias. Ocorre o mesmo fenómeno com uma ligação triângulo-estrela.

Se a relação de transformação se mantiver constante, a potência aparente do transformador e a potência útil máxima não são modificadas relativamente aos casos das ligações estrela-estrela ou triângulo-triângulo.

A independência entre a potência útil máxima face ao modo de ligação do transformador é característica da ponte trifásica. Na verdade, as diferenças devidas às formas de onda da corrente de fase e de linha nas configurações estrela-estrela, triângulo-triângulo, triângulo-estrela ou estrela-triângulo não correspondem a uma modificação das amplitudes das diferenças harmónicas presentes nas correntes mas somente a uma modificação das suas defasagens.

Os enrolamentos dos transformadores ligados aos onduladores têm o neutro isolado, sendo a referência de tensão assegurada, do lado da corrente contínua, através da ligação à terra do ponto de junção dos dois onduladores, o que é garantido pela ligação bipolar. Os neutros dos transformadores estão ligados à terra do lado primário.

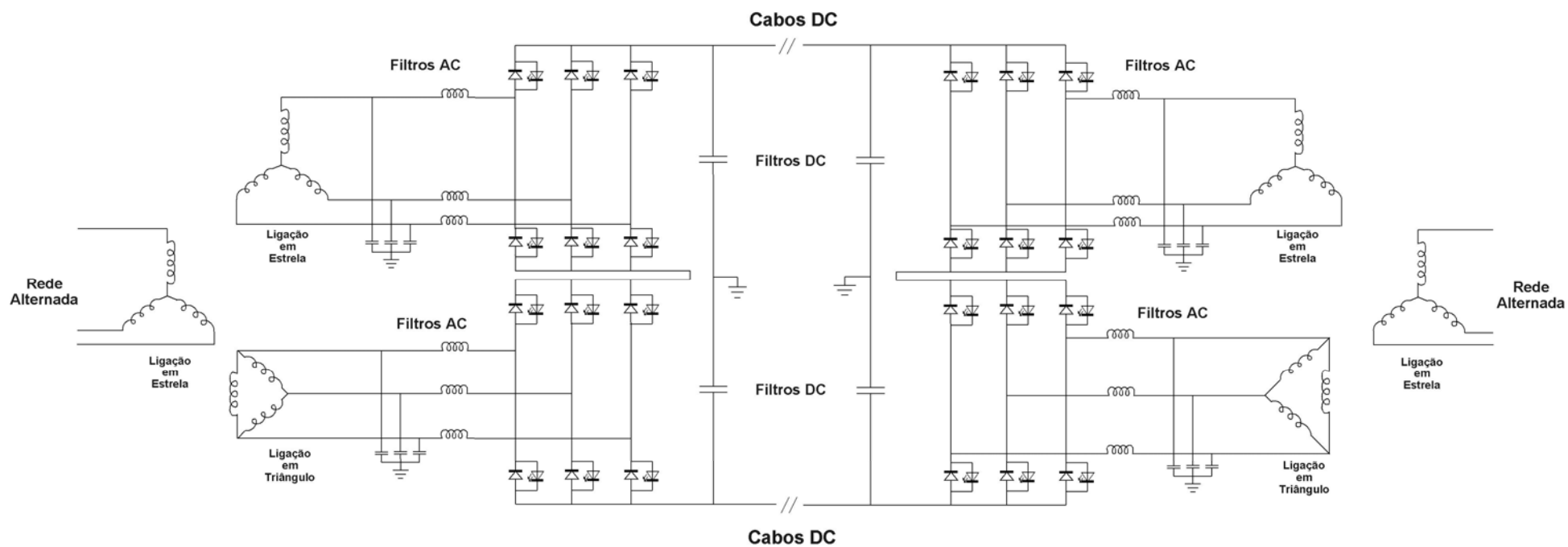


Figura 6.4 – Ligação dos transformadores presentes na conexão entre ilhas.

6.1.3 Filtro AC

O filtro presente no lado alternado da ligação tem por base dois componentes distintos, uma bobine, também chamada de reactor de fase e um condensador. Estes elementos, estão presentes em todas as fases do circuito e em regime permanente, a corrente média que circula no condensador e a tensão aos terminais da bobina são nulas.

No que respeita ao denominado reactor de fase, este consiste basicamente em bobines verticais que estão em isoladores. As bobines para as altas-frequências têm comportamento capacitivo. Esta característica é denominada por capacidade dispersa e durante a concepção desta montagem, tal particularidade deve ser minimizada. Por exemplo, a variação acentuada das correntes demonstra a presença de altas-frequências nesta montagem, sendo assim é normal que este efeito capacitivo das bobines se possa manifestar.

Este componente vai contribuir para um controlo contínuo e independente da potência, em que as harmónicas de corrente são bloqueadas. Actua também como um filtro passa-baixo, de modo a fornecer a fundamental da tensão, para o teste padrão do PWM. Colabora igualmente no controlo da potência activa e reactiva, já que a tensão da frequência fundamental define o trânsito de potência.

A utilidade deste elemento passa por assegurar através da sua indutância, o alisamento da corrente. A diminuição da ondulação da corrente justifica-se, por exemplo, para diminuir as perdas internas do transformador, bem como evitar perturbações na rede alternada. Esta bobine limita também as correntes de curto-circuito e é importante na eliminação da distorção no lado da rede. Esta deverá ter escudos que eliminem os campos magnéticos exteriores

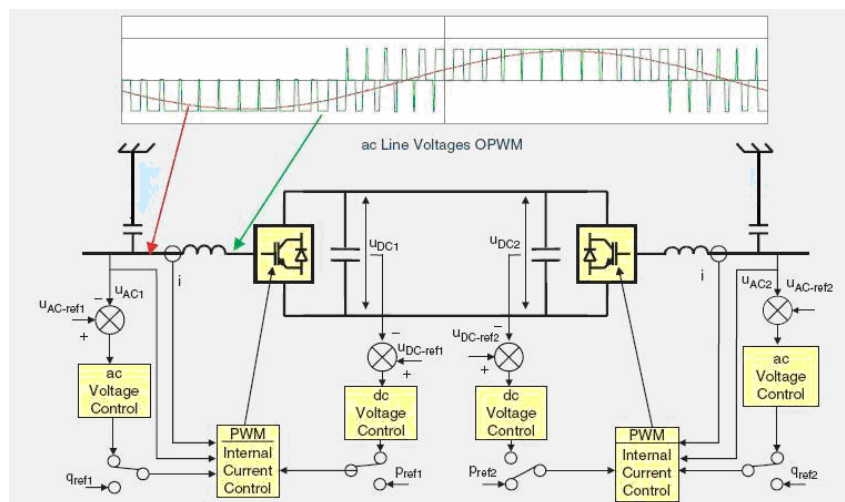


Figura 6.5 – Figura representativa dos principais elementos existentes numa ligação entre ilhas [ABB_HVDC].

Em relação ao condensador do filtro AC, uma das suas funções é absorver as sobretensões introduzidas na rede pelo ondulator. Ligar a tensão de saída do ondulator com a rede alternada, requer que esta seja sinusoidal. Tal é conseguido, também, com a ajuda deste filtro, porque vai conferir inércia à onda de saída, o que vai contribuir para a sua forma de onda sinusoidal, como a Figura 6.5 demonstra.

Um factor determinante na escolha da capacidade do condensador que constitui este filtro, será o índice de pulsação; de seguida far-se-á uma abordagem a esta temática.

A tensão de saída decomposta em série de Fourier, é igual a:

$$u = \sum_{j=1}^{\infty} u_{(2j-1)M} \sin[(2j-1)\omega t]$$

Equação 6.1

Com a fórmula da onda moduladora obedecendo à seguinte expressão:

$$(u)_{(2j-1)M} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u \sin[(2j-1)\omega t] d\omega t = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} u \sin[(2j-1)\omega t] d\omega t$$

Equação 6.2

Neste caso, considere-se por exemplo, que temos uma modulação síncrona sinusoidal de três níveis, para a moduladora a solução analítica da sua discretização será:

$$(u)_{(2j-1)M} = \frac{2U}{(2j-1)\pi} \times$$

$$\times \left\{ \sum_{k=1}^{\frac{p}{2}} \cos \left((2j-1) \left[\frac{\pi}{p} + 2(K-1) \frac{\pi}{p} - \frac{\pi}{p} \frac{X_{mo}}{X_{po}} \sin \left(\frac{\pi}{2p} + 2 \left(K-1 \right) \frac{\pi}{p} \right) \right] \right) \right\} -$$

$$- \sum_{k=1}^{\frac{p}{2}} \cos \left((2j-1) \left[\frac{\pi}{p} + 2(K-1) \frac{\pi}{p} + \frac{\pi}{p} \frac{X_{mo}}{X_{po}} \sin \left(\frac{3\pi}{2p} + 2 \left(K-1 \right) \frac{\pi}{p} \right) \right] \right)$$

$$K \in [1, 2, 3, 4, \dots]$$

Equação 6.3

A onda de tensão fundamental criada terá uma frequência igual a 50Hz, mas desta fazem parte harmónicas, com outras frequências, que devem ser eliminadas, através de filtros.

A componente útil, primeiro termo desenvolvido, corresponde à componente alternada sinusoidal com frequência, $\omega=314$ (neste caso), a componente parasita é igual aos outros termos desenvolvidos pela fórmula anterior.

Por exemplo, com o índice de pulsação de 10, ter-se-ia $k=1$ (fundamental), $k=9$ e $k=11$, $k=7$ e $k=13$, etc.

$$u = V_M \sin(t) + V_{M_{11}} \sin(11\omega t) + V_{M_9} \sin(9\omega t) + V_{M_7} \sin(7\omega t) + V_{M_{13}} \sin(13\omega t) + \dots$$

$$\omega = 314 \text{ (frequência da rede)}$$

Equação 6.4

Com índice de pulsação igual a 100, por exemplo, ter-se-ia $k=1$ (fundamental), $k=99$ e $k=101$, $k=97$ e $k=103$, etc.

$$u = V_M \sin(t) + V_{M_{101}} \sin(101\omega t) + V_{M_{99}} \sin(99\omega t) + V_{M_{97}} \sin(97\omega t) + V_{M_{103}} \sin(103\omega t) + \dots$$

$$\omega = 314 \text{ (frequência da rede)}$$

Equação 6.5

Quanto mais alta a frequência das harmónicas mais facilmente se filtram; portanto, o índice de pulsação deve ser tão alto quanto possível, de modo a ter harmónicas com uma frequência longe da fundamental. Para a potência em causa será razoável admitir uma frequência para a portadora de um milhar de Hz's, o que resulta num índice de pulsação na ordem das dezenas, no enquanto, a frequência da portadora é limitada pela elevada potência em jogo

Resumindo, é o índice de pulsação que determina a frequência das harmónicas. Se se aumentar o índice de pulsação, a frequência da harmónica sobe, o que torna mais fácil a sua eliminação através de filtros, nomeadamente condensadores de baixa impedância.

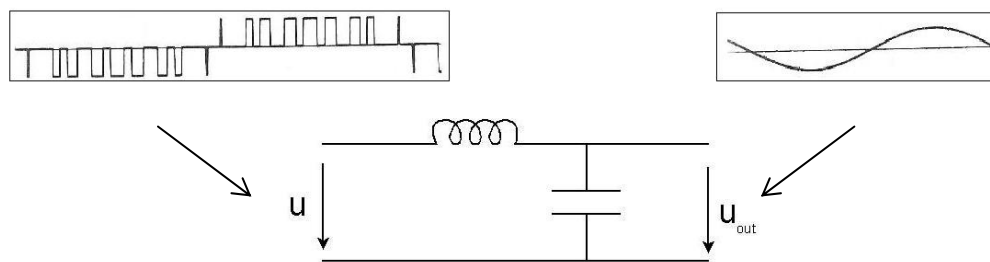


Figura 6.6 – Importância do filtro AC na forma de onda da tensão.

A figura anterior representa de forma muito simplificada a importância do filtro AC na forma de onda da tensão, tornando-a mais sinusoidal. O que vai contribuir também, para a qualidade da energia fornecida, já que um dos factores a analisar, é a qualidade da onda de tensão, como a sua amplitude; tremulação; desequilíbrio; harmónicas; sobretensões; cavas, entre outros.

6.1.4 Filtro DC

Os filtros DC são compostos basicamente por condensadores, neles passa predominantemente a corrente alternada. Neste caso, harmónicas presentes no circuito contínuo. Assim sendo estas harmónicas vão sofrer um curto-circuito. Além disso, alisa os valores da tensão à entrada do ondulator de tensão.

O objectivo deste componente passa também por providenciar um caminho com indutância baixa para as “correntes de fuga”, servindo por vezes como fonte de energia e também contribui para a atenuação de sobretensões. Reduz, também, as harmónicas presentes no circuito contínuo. As perturbações no AC repercutem variações de voltagem no DC; a capacidade de limitar estas variações depende da capacidade deste elemento.

Em determinadas circunstâncias, se a rota do cabo D.C. partilhar da maneira directa o funcionamento dos subscritores de telefone ou algo similar, há uma possibilidade de exposição às interferências das harmónicas do cabo. Sob estas circunstâncias e para as circunstâncias onde uma medida preventiva local não é praticável, o terceiro partido (companhia do telefone) deve ser consultado para limites permissíveis da interferência.

Assim três diferentes critérios devem ser considerados na performance do filtro DC, neste tipo de transmissão:

- Máxima voltagem TIF (Telephone Influence Factor) no trânsito de potência em corrente contínua.
- Máxima permissão de ruído nas linhas de telefone próximas dos cabos, deve ser considerada uma distância mínima de 1 km em redor [Arrillaga].

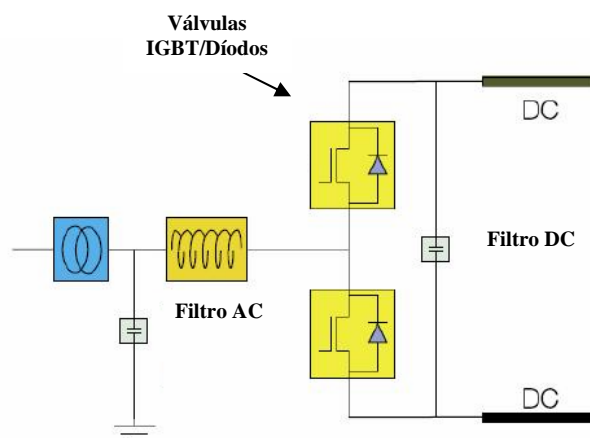


Figura 6.7 – Figura representativa dos elementos constituintes, de uma fase, de um dos extremos da ligação [ABB_HVDC].

6.1.5 Disjuntores de Corrente Alternada

Destinam-se a interromper a alimentação de corrente alternada aos transformadores no caso de sobrecarga/defeitos neste sistema e a retirar de serviço o sistema de corrente contínua no caso de indisponibilidade dos onduladores e/ou filtros. Os defeitos no sistema de corrente contínua são eliminados pelo de controlo dos onduladores.

6.1.6 Outros Componentes

A utilização de filtros de alta-frequência pode ser útil. São normalmente ligados entre o transformador e o conversor, para suprimirem correntes de alta-frequência. Por vezes, estes filtros são também colocados no lado DC, entre o filtro e os cabos DC.

Outro componente geralmente utilizado é o denominado reactor DC, é usado no lado da corrente contínua, para suavizar a corrente e proteger o ondulator das oscilações imprevistas. Este tem um valor típico na ordem dos 300-600 mH.

6.2. Vantagens de uma Ligação em Corrente Contínua

A escolha do tipo de ligação das ilhas em estudo, foi feita com base no estudo de diversos aspectos e contrapartidas no domínio da engenharia electrotécnica. De seguida, desenvolve-se alguns destes pontos de vista.

Na transmissão em corrente continua, o controlo de potência reactiva é independente da potência activa, o que confere estabilidade e qualidade à energia. O conversor pode mudar da potência reactiva capacitiva máxima para o máximo da potência reactiva indutiva, a rapidez desta mudança depende do comando do ondulator. O controlo PWM, confere ao sistema uma resposta dinâmica mais rápida, o que reduz também a necessidade de filtros de grande capacidade.

Um dos problemas da transmissão na rede alternada é o efeito capacitivo que os cabos provocam, nomeadamente os subterrâneos, que geram muito potência reactiva. O esquema equivalente em π , é o que melhor representa uma linha em corrente alternada longa com grandes tensões.

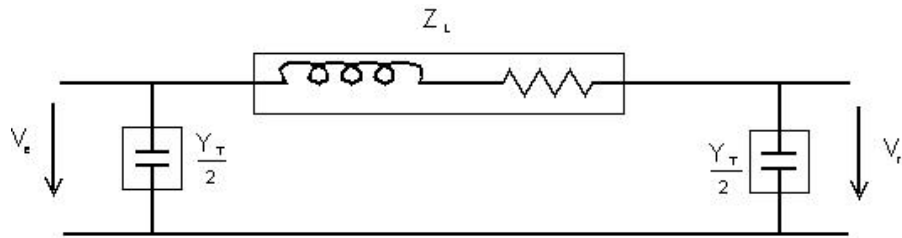


Figura 6.8 – Esquema equivalente em π de uma linha.

Na linha de corrente contínua em estudo, com uma tensão na ordem dos 15 kV, o problema da geração de potência reactiva não se aplica, e pode ser representada pelo modelo da linha curta da figura seguinte.

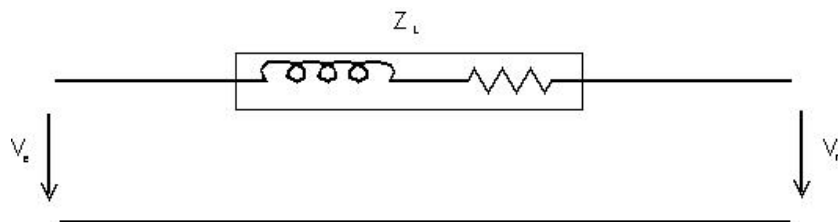


Figura 6.9 – Esquema equivalente de uma linha curta.

Este equipamento tem também, a capacidade de fornecer energia à rede após esta ter sofrido um “blackout”, podendo ser comparado a um motor/gerador sem massa, que fornece potência auxiliar, garantindo a estabilidade da voltagem/frequência no arranque.

A adição de um circuito AC a uma qualquer rede faz aumentar a sua potência de curto-circuito. Em casos extremos, tem de se efectuar um aumento das subestações, redimensionar protecções, etc. Com este sistema não é necessário ter em conta esse factor, o que pode ser uma vantagem no caso em estudo.

As perdas numa transmissão DC são reduzidas em aproximadamente dois-terços [Muhammand], quando comparadas com um sistema AC. Para tal contribui, a redução das perdas no dieléctrico dos cabos e uma diminuição do efeito de coroa. Este fenómeno é explicado pela ionização do ar em volta do condutor que pode ocorrer a partir de determinado valor de tensão; quando acontece, parece observar-se na escuridão todo o condutor envolto por uma auréola luminosa azulada, que produz um ruído semelhante a um apito. O efeito de coroa tem mais efeito em altas tensões, no caso em estudo terá uma importância menor.

A ausência do “efeito pelicular” também ajuda na diminuição das perdas. Este é comum em sistemas alternados, já que durante a condução, a densidade de corrente tem tendência a concentrar-se no exterior do condutor, esta migração poderá ser modelizada por um aumento da resistência do condutor.

Na transmissão de energia através de um sistema de corrente contínua, são necessários apenas dois condutores, o que diminui as necessidades de espaço e consequentemente menos custos na obtenção dos mesmos.

Existem outras valências deste tipo de transporte de energia, tais como:

- Menos logística durante a sua construção.
- Alta disponibilidade – 98,5/99% [ABB_HVDC].
- Pouca manutenção e reduzidos custos de operação.

7. Análise do Funcionamento do Ondulador

Os onduladores de tensão têm como principal função interligar um circuito de tensão contínua, a outro circuito que tem por base uma corrente alternada sinusoidal. Neste caso, uma rede trifásica. Estes onduladores, serão obviamente, responsáveis pela transferência de energia da tensão contínua para o circuito de corrente alternada e vice-versa. A descrição efectuada incide sobre os onduladores monofásicos, pelo que o ondulador trifásico a utilizar terá comportamento semelhante.

A análise feita recairá sobre ondulares autónomos, uma vez que, a frequência aos terminais do receptor pode ser fixada (neste caso 50Hz). E sendo assim o seu funcionamento não interfere na defasagem, que pode existir entre as grandezas alternadas neste caso as tensões. Este tipo de inversor tem uma característica muito importante, que é a sua reversibilidade, uma vez que o trânsito de potência pode ser feito nos dois sentidos.

7.1. Comando do Ondulador e Princípio de Funcionamento

No comando do ondulador, a modulação adoptada será por largura de impulso, MLI ou Pulse Width Modulation (PWM). Este comando vai permitir uma vasta gama de variação da amplitude fundamental da tensão, sem que isso degrade a sua forma de onda. Por outro lado, tem a vantagem de reduzir as harmónicas de ordem pouco elevada, facilitando assim a filtragem da onda de saída.

Para implementar este comando existem várias técnicas, sendo as mais frequentes:

- Modulação síncrona de dois níveis, linear ou sinusoidal
- Modulação síncrona de três níveis, linear ou sinusoidal
- Modulação assíncrona de dois níveis, sinusoidal

Estas técnicas terão como objectivo, realizar cortes na tensão de entrada do ondulador em cada semiperíodo, o que vai originar na saída um conjunto de fatias de larguras controláveis. Para tal acontecer são impostas comutações suplementares nos interruptores que ligam um terminal do receptor às duas extremidades do gerador.

Neste trabalho a técnica aconselhada será a **modulação síncrona de três níveis sinusoidal**. Assim, a componente fundamental da tensão de saída varia por 3 níveis, +U, 0 e -U. As comutações têm o objectivo de obter uma anti-simetria entre as alternâncias positivas e negativas e uma simetria em relação ao quarto período. Evitando assim, o aparecimento de harmónicas pares. A tensão de saída transitoriamente passa de +U a 0 e vice-versa nas alternâncias positivas, e de -U a 0 e vice-versa nas alternâncias negativas.

O princípio básico desta modulação é a comparação de duas funções essenciais. A primeira tem o nome modulante, cuja amplitude neste caso, é igual ao valor absoluto de uma sinusóide com frequência e amplitude que determinam as da onda de saída. A segunda função dá pelo nome de portadora, com a forma de uma onda triangular tem frequência angular ω_p e desempenha um papel muito importante na eliminação das harmónicas, porque garante a condição de simetria em relação ao quarto período. A sua pulsação é um múltiplo de ω da onda de saída.

Um factor muito importante no controlo do ondulator é o índice de pulsação **p**, este corresponde à relação da frequência angular da portadora e da tensão de saída:

$$p = \omega_p / \omega = 2K - 1 \quad K \in [1, 2, 3, \dots]$$

Equação 7.1

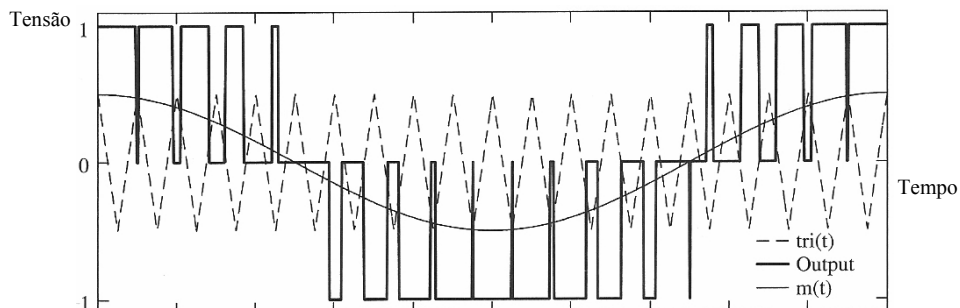


Figura 7.1 – Controlo PWM de 3 níveis (modulação sinusoidal).

Para cada instante de tempo, em cada ângulo instantâneo das fundamentais das tensões alternadas do conversor (ângulo do conversor) e para um determinado índice de modulação, o comando define as funções de disparo.

Para o caso em estudo será necessário o uso de onduladores trifásicos, onde se realiza a modulação sobre três braços, comparando a portadora com três moduladoras alternadas sinusoidais, neste caso. As três sinusóides apresentam a mesma amplitude e devem estar desfasadas entre si um terço de período.

Para se obter aos terminais da rede alternada, três ondas análogas de tensão desfasadas e que apresentem simetria relativa ao quarto de período e anti-simetria relativa ao semiperíodo, é necessário utilizar uma portadora com frequência múltipla ímpar de 3 vezes da frequência da onda de saída. A anti-simetria entre alternâncias é assegurada por um sinal lógico de relação 0,5, que tem por função designar o braço submetido à modulação em cada alternância.

A escolha da frequência da portadora com um valor múltiplo de 3 da frequência da saída, tem a vantagem de eliminar as harmónicas múltiplas da frequência da portadora nas tensões de linha. A sua presença nas tensões de braço pode ter amplitudes particularmente elevadas, quando a profundidade de modulação é considerável.

A determinação das tensões compostas e das tensões simples deduz-se das tensões dos braços, bem como, os conteúdos harmónicos das tensões de fase e das tensões compostas.

Para o sistema trifásico ser equilibrado, os comandos de dois braços sucessivos devem estar desfasados entre si um terço do período. A cada braço do ondulator, corresponde uma função que resulta do estado dos interruptores.

$$f_1(\omega t) = 1 \Leftrightarrow 2K\pi \leq \omega t < (2K+1)\pi$$

$$f_2(\omega t) = 1 \Leftrightarrow 2K\pi + \frac{2\pi}{3} \leq \omega t < (2K+1)\pi + \frac{2\pi}{3}$$

$$f_3(\omega t) = 1 \Leftrightarrow 2K\pi + \frac{4\pi}{3} \leq \omega t < (2K+1)\pi + \frac{4\pi}{3}$$

com $K \in [0, 1, 2, \dots]$

Equações 7.2

Estas funções de disparo são a origem das tensões alternadas compostas e são dadas por:

$$u_{saídaC1} = [f_1(\omega t) - f_2(\omega t)]u_1$$

$$u_{saídaC2} = [f_2(\omega t) - f_3(\omega t)]u_1$$

$$u_{saídaC3} = [f_3(\omega t) - f_1(\omega t)]u_1$$

Equações 7.3

Como já foi demonstrado, o secundário do transformador de ambos os lados da ligação, possui dois enrolamentos, um em estrela e outro em triângulo, pelo que é necessário ter em conta este tipo de ligação para se determinar as grandezas de fase.

Ligação em estrela:

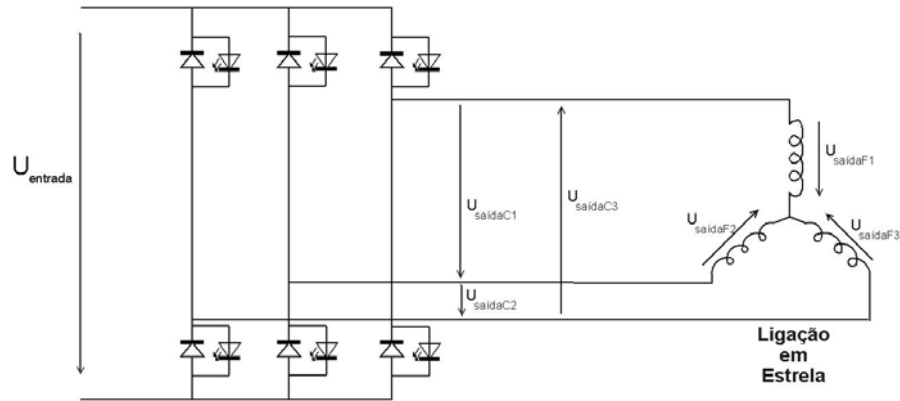


Figura 7.2 – Ligação do ondulador ao transformador em estrela.

Por uma questão de simplificação, considera-se o caso mais usual onde existe a ausência de componentes homopolares nas tensões de fase.

$$u_{saídaF1} + u_{saídaF2} + u_{saídaF3} = 0$$

Equação 7.4

Assim,

$$u_{saídaC1} = u_{saídaF1} - u_{saídaF2}$$

$$u_{saídaC2} = u_{saídaF2} - u_{saídaF3}$$

$$u_{saídaC3} = u_{saídaF3} - u_{saídaF1}$$

Equações 7.5

Tendo como base as equações anteriores, e fazendo a diferença entre elas rapidamente se obtêm as equações seguintes:

$$u_{saídaF1} = \left[\frac{2}{3} f_1(\omega t) - \frac{1}{3} f_2(\omega t) - \frac{1}{3} f_3(\omega t) \right] u_{entrada}$$

$$u_{saídaF2} = \left[\frac{2}{3} f_2(\omega t) - \frac{1}{3} f_1(\omega t) - \frac{1}{3} f_3(\omega t) \right] u_{entrada}$$

$$u_{saídaF3} = \left[\frac{2}{3} f_3(\omega t) - \frac{1}{3} f_1(\omega t) - \frac{1}{3} f_2(\omega t) \right] u_{entrada}$$

Equações 7.6

Ligação em triângulo:

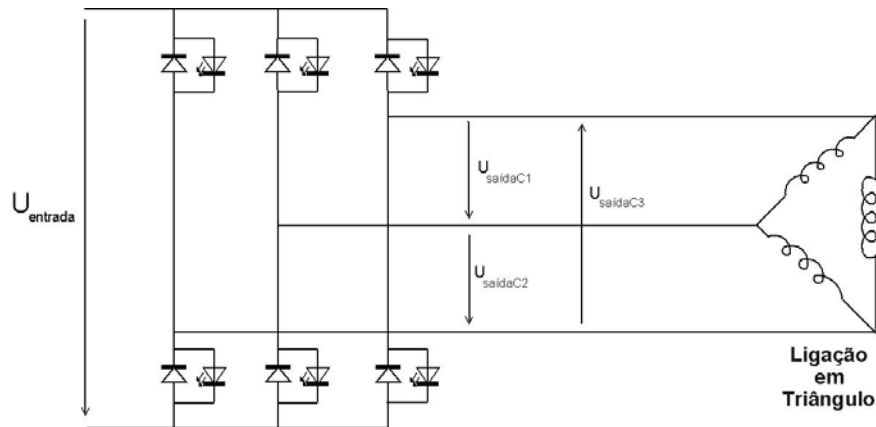


Figura 7.3 – Ligação do ondulator ao transformador em triângulo.

Neste caso as tensões de fase tornam-se mais simples de calcular, já que são iguais às tensões compostas.

$$u_{saídaC1} = u_{saídaF1}$$

$$u_{saídaC2} = u_{saídaF2}$$

$$u_{saídaC3} = u_{saídaF3}$$

Equações 7.7

Quando do ondulator se pretende gerar um sistema de correntes alternado trifásico, desfasado δ , do sistema trifásico da rede; serão necessários sensores que indiquem em cada período a posição instantânea da rede, ou o seu ângulo. A figura seguinte descreve sinteticamente o circuito de comando do ondulator.

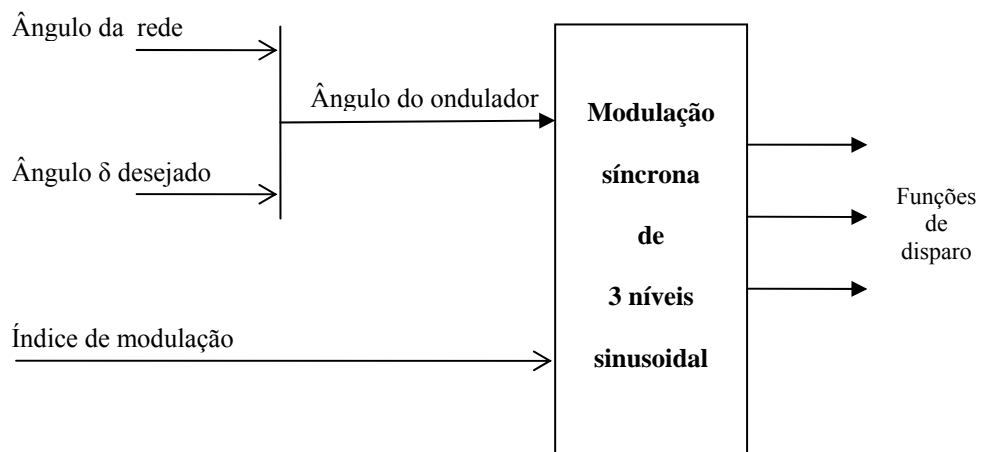


Figura 7.4 – Circuito simples de Comando.

O circuito de controlo terá três entradas: a posição em cada instante das tensões da rede de energia, o ângulo de defasagem pretendido e o índice de modulação (razão entre as amplitudes máximas da modulante (onda sinusoidal) e portadora (onda triangular)). Na saída teremos três funções de disparo, uma para cada braço do ondulator.

A forma de onda da tensão de saída do ondulator e o seu comando, dependem da tensão contínua à entrada do ondulator, pelo que a corrente de saída deriva da tensão do ondulator naquele instante e da tensão da rede, como demonstra a figura seguinte.

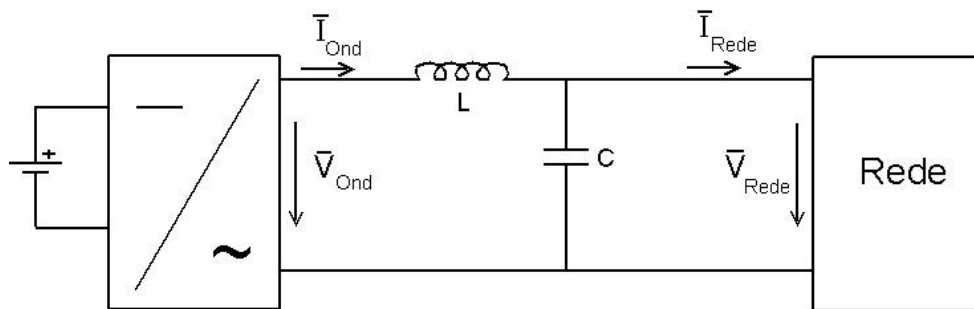


Figura 7.5 – Diagrama simples do circuito estudado.

Controlando a amplitude da tensão de saída do ondulator, através da modulante, a sua corrente de saída vai ser influenciada. Se se considerar o diagrama da figura 7.5, a corrente é calculada de forma simples, através das equações a seguir deduzidas.

$$-\bar{V}_{Ond} + \bar{I}_{Ond} \cdot j\omega L + \frac{1}{j\omega C} (\bar{I}_{Ond} - \bar{I}_{Rede}) = 0 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \bar{V}_{Ond} = \bar{I}_{Ond} \cdot j\omega L + \frac{1}{j\omega C} (\bar{I}_{Ond} - \bar{I}_{Rede})$$

Equação 7.8

$$\bar{V}_{Rede} - \frac{1}{j\omega C} (\bar{I}_{Ond} - \bar{I}_{Rede}) = 0 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \bar{V}_{Rede} = \frac{1}{j\omega C} (\bar{I}_{Ond} - \bar{I}_{Rede})$$

Equação 7.9

As equações anteriores foram obtidas através da Lei das Malhas, do abreviado circuito da figura 7.5, o conjunto destas duas equações permite assim, obter uma fórmula simplificada da corrente de saída do ondulator.

$$-\bar{V}_{Ond} + \bar{I}_{Ond} \cdot j\omega L + \bar{V}_{Rede} = 0 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \bar{I}_{Ond} = \frac{\bar{V}_{Ond} - \bar{V}_{Rede}}{j\omega L}$$

Equação 7.10

7.2. Vantagens e Desvantagens deste Comando

A modulação síncrona sinusoidal reduz muito as harmónicas de baixa ordem, quando se tem índice de modulação elevado mas esta modulante é complexa, e a gama de variação da amplitude da fundamental da onda de saída é menor, quando comparada com uma modulação linear.

O facto da tensão de saída variar ao longo de três níveis é uma vantagem, já que, tem um conteúdo harmónico baixo e menor número de comutações, em comparação por exemplo com a modulação de dois níveis. Este é um aspecto importante, pois menos comutações implica menos perdas nos semicondutores. Numerosas comutações traduzem perdas, neste caso, estas são directamente proporcionais ao índice de pulsação do ondulator, o que pode ser um problema nos conversores de grande potência, como é o caso.

No comando PWM a amplitude da saída é no máximo igual à sua entrada, o que pode visto, como uma desvantagem em relação ao Voltage-Sourced Inverter com saída de onda quadrada, que consegue uma amplitude 27%⁶ maior que um PWM convencional.

Por fim, há o problema da distorção. Apesar da aplicação dos filtros, o inversor tem harmónicas na saída que se estendem a altas-frequências. Até pequenos componentes, que operam na ordem dos megahertz podem interferir nas comunicações do equipamento, sensores, sinais analógicos e por vezes na lógica digital.

7.3. Análise do Conteúdo Harmónico

Este tipo de comando acarreta um conteúdo harmónico que vale a pena analisar. A figura seguinte, representa as amplitudes das harmónicas da tensão de saída em função da relação das amplitudes da modulante e portadora (X_m/X_p).

⁶ Fonte: Philip T. Krein, Capítulo 6 do livro “Elements of Power Electronics”, Oxford University Press, 1998

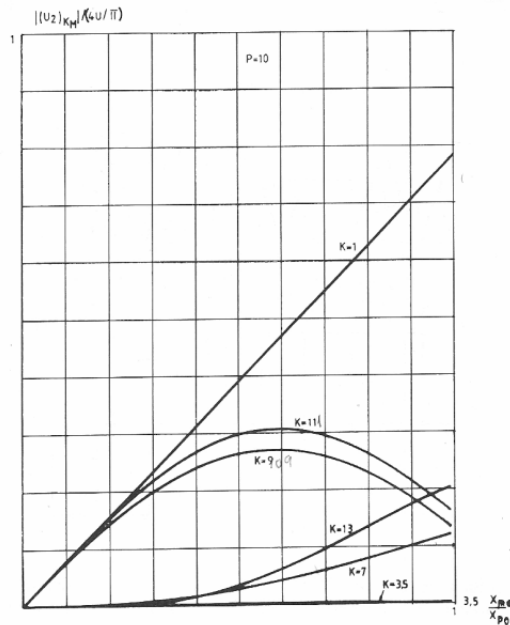


Figura 7.6 – Amplitudes das harmónicas no controlo PWM de 3 níveis (modulação sinusoidal) [Labrique].

Como se pode analisar, a amplitude da componente fundamental de u_2 pode ser regulada entre 0 e um valor máximo correspondente a 0,78% de $4U/\pi$ (amplitude fundamental do comando de plena onda). Além disso, observa-se que as amplitudes das harmónicas tendem para zero quando X_m tende para zero. O gráfico aqui em análise corresponde ao ondulator monofásico, considera-se que o ondulator trifásico tem comportamento semelhante.

Se o índice de pulsação for múltiplo de 3, como se referiu anteriormente, as componentes harmónicas de ordem três que são assim introduzidas ao nível das tensões de braço, estas não degradam a qualidade das ondas de saída na medida em que elas não aparecem nas tensões compostas e nas tensões simples.

O correcto conhecimento das harmónicas que compõem o espectro das variáveis dependentes do conversor, torna-se necessário para o exacto dimensionamento dos filtros situados na entrada e saída do conversor.

A existência de desequilíbrios na tensão de alimentação ou nas reactâncias dos transformadores, bem como, a não equidistância dos instantes de disparo dos semicondutores dão lugar à geração de harmónicas de ordem diferente das acima obtidas, denominadas harmónicas não características.

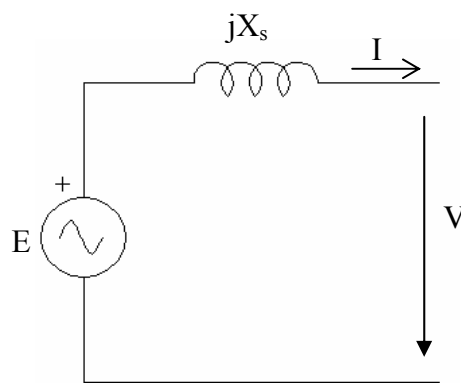
A utilização de sistemas de ignição que garantem a equidistância dos instantes de disparo, contribui assim para reduzir a geração de harmónicas não características. Na generalidade dos casos, a amplitude das harmónicas não características geradas por desequilíbrio no sistema de corrente alternada e nos transformadores dos onduladores não é

significativa. Exceptua-se o caso em que existam condições de ressonância, para as frequências das harmónicas não características, situação que pode originar uma amplificação importante da amplitude destas harmónicas.

7.4. Analogia deste Ondulador com a Máquina Síncrona

Se a distorção na entrada e saída do ondulador for pequena, o conversor visto do lado da rede em regime permanente é semelhante a uma máquina síncrona. O conversor pode ser visto do lado da rede em regime permanente, como sendo uma máquina síncrona, a potência mecânica útil no veio da máquina síncrona corresponde à potência eléctrica no lado contínuo do conversor; a corrente no circuito de excitação da máquina síncrona será equivalente ao índice de modulação, atrás referido, e às reactâncias síncronas corresponderão as reactâncias do filtro alternado.

No que respeita à estrutura da máquina síncrona, convém reter que a tensão induzida, designada força electromotriz (f.e.m.), é sinusoidal, com frequência angular ω e está desfasada de 90° em atraso em relação ao fluxo.



a)

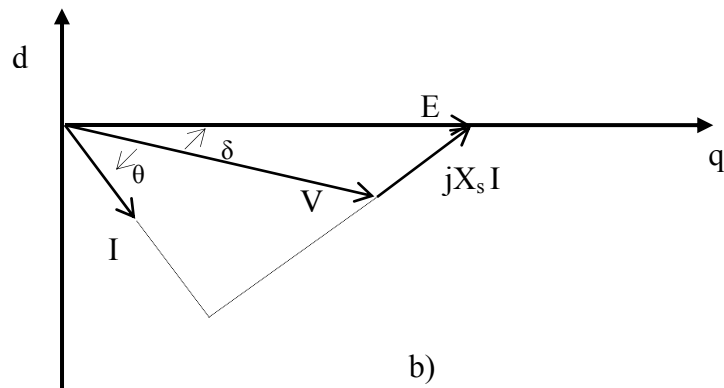


Figura 7.7 – Máquina síncrona (gerador): a) esquema monofásico equivalente; b) diagrama de fasores.

A máquina síncrona em regime estacionário (trifásico simétrico), pode ser representada pelo esquema monofásico equivalente da Figura 14 a). No diagrama de fasores representa na Figura 14 b), encontra-se a f.e.m. em série com a reactância síncrona. A análise da máquina síncrona na convenção gerador, é descrita pela equação seguinte.

$$-\bar{E} + jX_s I + \bar{V} = 0 \Leftrightarrow \bar{E} = jX_s I + \bar{V}$$

Equação 7.11

Em ambas as figuras desprezou-se a resistência dos enrolamentos, cujo valor é pequeno face à reactância e admitiu-se que a corrente I está desfasada, θ (em atraso), relativamente à tensão aos terminais V . O ângulo de defasagem δ entre a tensão V e a f.e.m., designa-se por ângulo de potencia, como acima foi exposto.

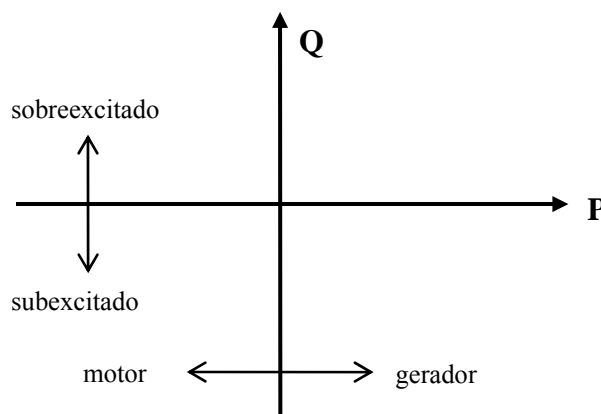


Figura 7.8 – Variação do funcionamento da Máquina Síncrona.

No funcionamento no modo de gerador, tem-se transferência de potência activa do conversor para a rede de energia, enquanto que no funcionamento no modo motor, o sentido é inverso. No funcionamento no modo de sobreexcitado, o trânsito de potência reactiva é do conversor para a rede de energia, ao passo que no modo subexcitado, é o simétrico, em analogia com a máquina síncrona.

Para cada valor de potência activa e conseqüentemente de potência eléctrica no lado contínuo, corresponderá um determinado ângulo de potência, δ . Será possível variar a potência reactiva actuando na amplitude das tensões na saída do conversor, como atrás foi demonstrado.

7.5. Trânsito de Potência no Ondulador

O trânsito de potência do conversor baseia-se em duas variáveis fundamentais, o ângulo de potência, δ e a amplitude da tensão de saída. Controlando estas grandezas o controlo de potência activa e reactiva está assegurado.

Mudando o ângulo de potência entre a tensão do conversor e a tensão da rede, o sentido da potência pode ser alterado a qualquer instante, para cada valor do ângulo de potência ter-se-á um valor de potência activa. Os diagramas seguintes elucidam as diferentes situações:

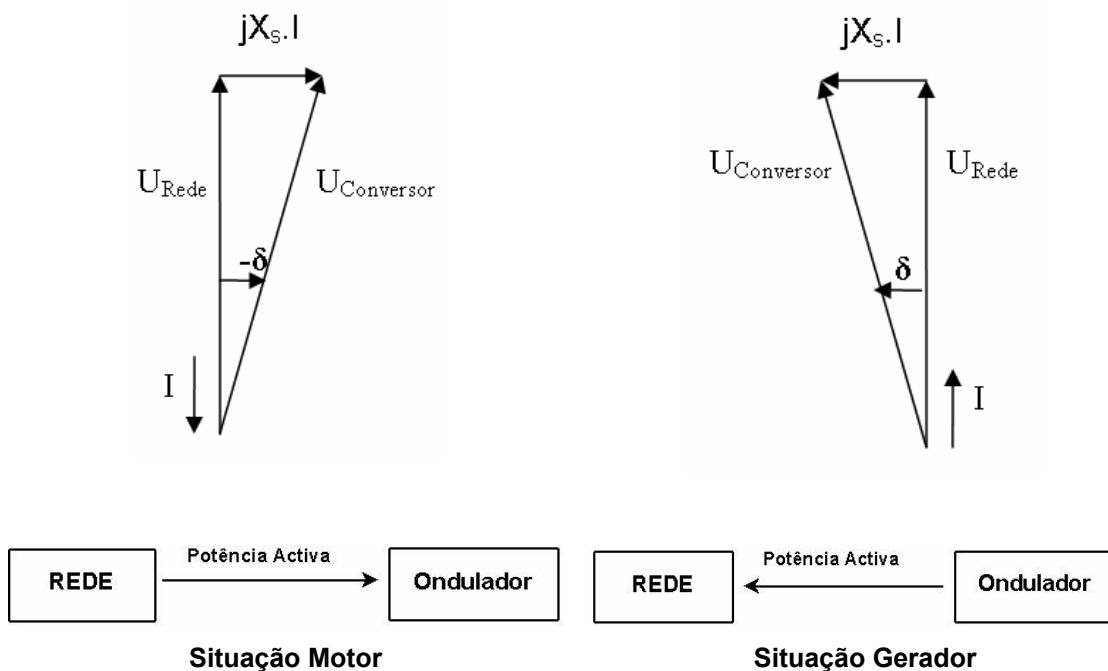


Figura 7.9 – Diagramas de funcionamento do Conversor – Potência Activa.

Os diagramas anteriores, traduzem os dois modos de funcionamento do conversor no que respeita ao trânsito de potência activa. Na situação motor, o ângulo de potência é negativo, estando a tensão da rede em avanço relativamente à tensão do conversor, a energia activa circula para o conversor.

Na situação gerador, o ângulo δ é positivo, a tensão do conversor está em avanço comparativamente à tensão da rede, logo a energia activa circula do conversor para a rede. Esta convenção é expressa no capítulo 7.4, onde é interessante constar que o funcionamento do ondulator e da máquina síncrona, são muito idênticos no que respeita ao trânsito de potência, como a equação seguinte demonstra (modo gerador).

$$\bar{E} = jX_s I + \bar{V} \rightarrow \bar{U}_{\text{Conversor}} = \bar{U}_{\text{Rede}} + jX_s I$$

Equação 7.12

Quanto à potência reactiva trocada com a rede, esta pode ser controlada através da amplitude da tensão de saída do conversor, mais precisamente, através da diferença entre a amplitude da tensão da rede e a saída do ondulator.

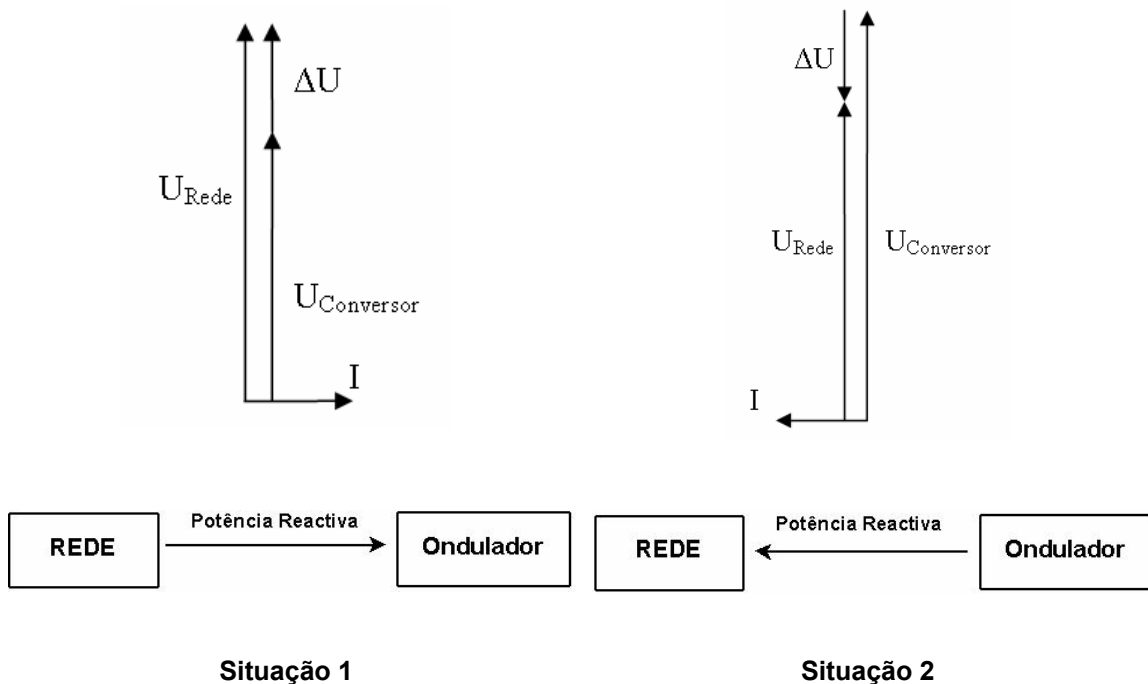


Figura 7.10 – Diagramas de funcionamento do Conversor – Potência reactiva.

Os diagramas anteriores traduzem os dois modos de funcionamento do conversor no que respeita ao trânsito de potência reactiva. Na situação 1, potência reactiva circula da rede

para o conversor, já que $U_{\text{Rede}} > U_{\text{Conversor}}$, comparando com a máquina síncrona, é a situação em que esta se encontra subexcitada. Na situação 2, potência reactiva transita do conversor para rede, pois $U_{\text{Rede}} < U_{\text{Conversor}}$, fazendo uma analogia com a máquina síncrona, é a situação em que esta se encontra sobreexcitada.

A regulação da amplitude das fundamentais das tensões alternadas do conversor, será feita através do **índice de modulação**, que é a razão entre as amplitudes máximas da modulante (onda sinusoidal) e portadora (onda triangular). Com esta regulação, torna-se possível fazer um controlo contínuo e rápido da potência reactiva, podendo-se efectuar um varrimento completo, o que inclui valores negativos.

8. Caracterização dos Cabos da Interligação

A transmissão de energia através de cabos subterrâneos, apresenta vantagens relativamente ao transporte aéreo, no que respeita ao impacto visual, esta uma razão de grande importância em muitos casos, como em áreas turísticas onde o efeito paisagístico é relevante. O uso de cabos que transmitem energia em corrente contínua, também tem vantagens relativamente ao sistema alternado, como a presença de campos electromagnéticos de valor muito baixo e ausência de correntes de terra.

8.1. Aspectos Construtivos

Basicamente, um cabo eléctrico de energia para a alta tensão, neste caso na ordem dos 15 kV, é constituído por um ou vários condutores de baixa resistência eléctrica (alma dos condutores) que permitem transmitir uma corrente eléctrica com elevada intensidade, nesta caso contínua. O condutor está envolvido por uma camada isolante que se destina a separá-lo electricamente relativamente ao exterior, de forma a suportar a tensão de serviço.

As circunstâncias de instalação e as influências externas podem também exigir à inclusão de outros componentes, tais como, écrans (protecção eléctrica), armaduras (protecção mecânica) e bainhas (protecção contra agentes exteriores). A figura seguinte demonstra a constituição possível do cabo a usar na transmissão em estudo.

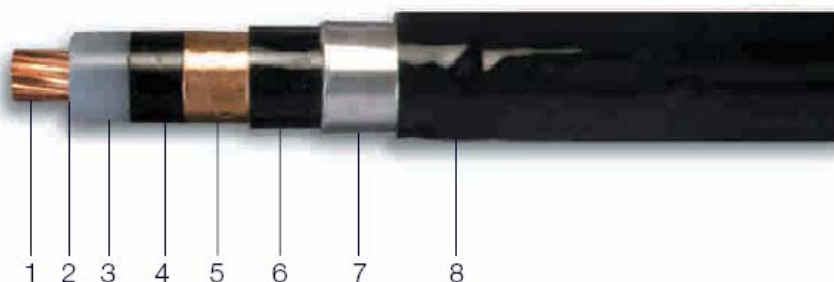


Figura 8.1 – Estrutura base do cabo a usar na interligação.

1. Conductor redondo, multifilar, compactado.
2. Composto semicondutor.
3. Isolamento de polietileno reticulado.
4. Composto semicondutor pelável mais fita semicondutora.
5. Blindagem de fita de cobre ou fios de cobre (écran metálico).
6. Bainha interior de PVC.
7. Armaduras de fitas de alumínio.
8. Bainha exterior de PVC.

8.1.1 Condutor

O condutor constitui o núcleo de transmissão de energia dos cabos eléctricos. Os materiais condutores mais comuns são o cobre macio e o alumínio, não só pelas excelentes condutividades que possuem, mas também pelo seu custo e pelas características mecânicas, traduzido na facilidade de serem transformados até forma de fio.

As secções dos condutores devem ser escolhidas de modo a reduzir as perdas devido ao seu aquecimento, de maneira que a instalação conserve um bom rendimento económico e que o aumento de temperatura não ultrapasse o limite máximo admissível pelo material de isolamento. Os condutores são normalmente constituídos por fios elementares cableados, em camadas concêntricas.

Tabela 8.1 – Valores típicos das características dos materiais usados habitualmente em cabos eléctricos [Cabelte].

Características Típicas	Cobre (recozido)	Alumínio (3/4 duro)
Grau de pureza (%)	> 99,9	> 99,5
Densidade	8,89	2,703
Resistividade a 20°C ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	0,017241	0,02826
Coef. Dilatação linear ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	17×10^{-6}	23×10^{-6}
Ponto de fusão ($^{\circ}\text{C}$)	1080	660
Condutividade ($\text{W}/\text{cm} \cdot ^{\circ}\text{C}$)	3,8	2,4
Tensão de rotura (N/mm^2)	225	125 a 205
Módulo de elasticidade (N/mm^2)	26	14
Alongamento à rotura (%)	20 a 40	1 a 4

No caso em estudo, estes condutores seriam fabricados com uma construção estanque, de modo a resistir à penetração longitudinal da água. A secção sugerida situa-se nos 500 mm², que suporta uma corrente na ordem dos 1000 A, valor habitual numa ligação desta natureza.

8.1.2 Materiais Isolantes

O isolamento dos condutores tem grande importância em matéria de segurança das condições de instalação e exploração e de adequação aos fins a que se destina.

Desde do aparecimento dos materiais isolantes sintéticos, ditos “secos”, estes suplantaram de imediato a tecnologia anterior (isolação a papel) nos cabos de média tensão até 30 kV. De todos os materiais o mais utilizado, actualmente, nos cabos de média tensão é o

polietileno reticulado, devido a várias factores como a sua estabilidade térmica, elevada resistência ao isolamento, estabilidade ao envelhecimento, correntes de transporte elevadas e menor custo global de instalação. A próxima tabela descreve alguns valores típicos deste material.

Tabela 8.2 – Características do polietileno reticulado [Cabelle].

Características	Valores típicos
Densidade, a 20° C	0,93
Resistividade térmica (K.m/W)	3,5
Resistência à tracção (N/mm ²)	≥12,5
Alongamento mínimo na rotura (%)	≥200
Permitividade relativa	2,5 a 4,5
Ângulo de perdas	10 a 40.10 ⁻⁴
Constante de isolamento (MΩ.km)	5000 a 50000

8.1.3 Camadas Semicondutores

O cabo eléctrico em estudo tem usualmente, duas camadas semicondutoras aplicadas interna e externamente relativamente ao isolamento, como demonstra a figura anterior.

A camada interna, denominada semicondutor interno, é aplicada por extrusão⁷ sobre o condutor e tem como objectivo a criação de uma superfície equipotencial uniforme em torno deste. Além disso, evita a concentração do campo eléctrico em pontos específicos correspondentes às irregularidades da periferia do condutor.

A camada externa, denominada semicondutor externo, é aplicada sobre o isolamento, podendo ser aderente ou facilmente destacável deste, e tem como principais funções facilitar a aplicação do écran metálico e criar condições necessárias à regularização e orientação do campo eléctrico. Esta camada também é aplicada por extrusão.

8.1.4 Écrans Metálicos

Estes constituintes são colocados sobre a camada semicondutora externa e têm em vista a protecção eléctrica (escoamento de correntes de defeito) e a protecção mecânica. São utilizados materiais condutores: cobre nu ou revestido por uma camada metálica, normalmente em estanho, ou alumínio e suas ligas.

⁷ A extrusão é um processo de produção de componentes mecânicos de forma semicontínua onde o material é forçado através de uma matriz, adquirindo assim a forma pré determinada pelo projectista.

A utilização destes materiais em écrans metálicos pode ser realizada por:

- Aplicação de uma ou várias fitas, em hélice ou longitudinalmente;
- Aplicação de fios dispostos helicoidalmente em torno do núcleo;
- Aplicação de tranças constituídas por grupos de fios, em malha helicoidal.

O modo de aplicação de écran metálico no caso em estudo, seria sobre cada um dos condutores isolados, já que no interior do isolante as linhas de força do campo eléctrico apresentam sempre uma direcção radial.

A componente tangencial do campo eléctrico não é desprezável, o que ocasiona uma limitação na tensão de utilização devido à menor rigidez dieléctrica do material isolante segundo aquela direcção. Assim é aconselhável a aplicação do écran metálico como foi especificado anteriormente, devido às tensões elevadas do caso aqui em estudo.

8.1.5 Armaduras

As armaduras têm por objectivo assegurar a protecção mecânica do cabo aos esforços transversais e longitudinais, como esmagamento, impacto, tracção e acção de roedores, entre outras.

São constituídas usualmente em aço macio, galvanizado ou não, sob forma de fitas ou fios, aplicados helicoidalmente. Quando é necessário melhorar o comportamento eléctrico poderão ser nelas incorporados fios de cobre. Poderão operar também como blindagens, desde que se obedeça aos requisitos específicos de natureza eléctrica.

Nas zonas submarinas os cabos estão sujeitos a maiores esforços mecânicos, será aconselhável o uso de fios de aço de modo a reforçar a armadura. Nas áreas da interligação onde se atinge grandes profundidades, será ainda aconselhável a utilização de duas camadas de armadura, com respectiva bainha de PVC, tendo em conta a exposição destes cabos a agentes externos e a elevadas pressões. A empresa ABB, com bastante experiência neste campo, usa frequentemente duas armaduras neste tipo de ligação, como demonstra a figura seguinte.



Figura 8.2 – Esquemático dos cabos usados pela ABB.

8.1.6 Bainhas Exteriores

As bainhas exteriores têm a função de assegurar a protecção do cabo às influências externas. Em particular devem garantir o isolamento em relação à água e melhorar a resistência a agentes nocivos, tais como substâncias corrosivas, agentes atmosféricos, etc.

Os materiais constituintes mais comuns são:

- PVC
- Polietileno
- Compostos ignífugos, bastante resistentes ao fogo.

A escolha dos materiais isolantes constituintes das bainhas é feita a partir de diversos critérios que estão apresentados na tabela seguinte.

Tabela 8.3 – Critérios a considerar na escolha de materiais para bainhas exteriores

Grupos de comportamentos	Critérios a considerar
Resistência a acções externas	Resistência mecânica Resistência a agentes atmosféricos Resistência a agentes químicos Resistência a roedores, microorganismos e térmitas
Características especiais de utilização	Comportamento térmico (altas e baixas temperaturas) Resistência ao fogo e à propagação da chama Toxicidade de produtos de combustão Comportamento eléctrico relevante
Características especiais e instalação e exploração	Flexibilidade Estanquidade Corrosão Envelhecimento

8.2. Dimensão dos Cabos da Interligação

A ligação das redes energéticas das três ilhas só será possível através de cabos submarinos, onde serão estudados 3 troços de ligação. Por sua vez, estes vão constituir uma ligação em triângulo das três redes.

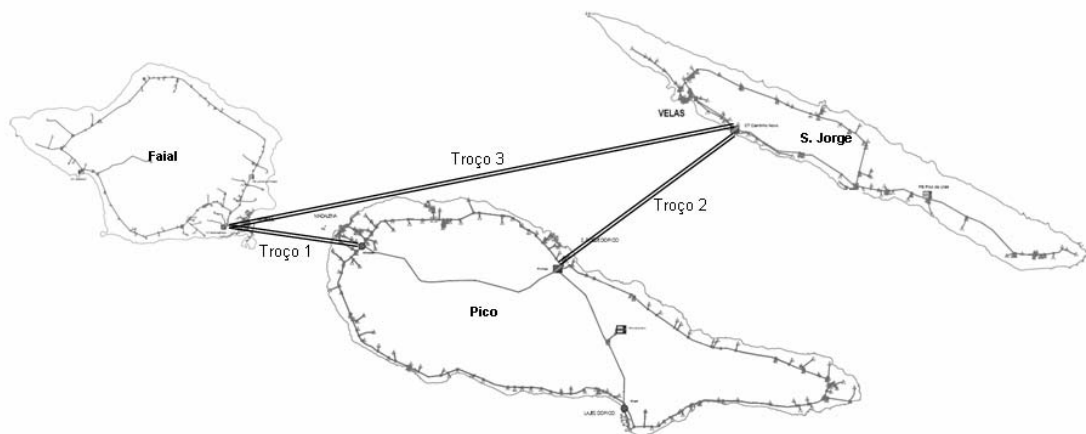


Figura 8.3 – Posicionamento dos diferentes troços da interligação.

Uma ligação em triângulo trará muitos benefícios num projecto deste tipo, já que, em caso de falha de um dos cabos ou outros equipamentos, a ligação fica assegurada. Por outro lado, o trânsito de potência fica facilitado, já que, em caso de *blackout* de uma das ilhas, esta pode receber potência das outras duas, o que causará menos sobrecarga nos cabos de transmissão e, conseqüentemente menos perdas.

De seguida e para se ter uma noção real desta interligação, são mostradas imagens de satélite, retiradas do programa informático *Google Earth*.

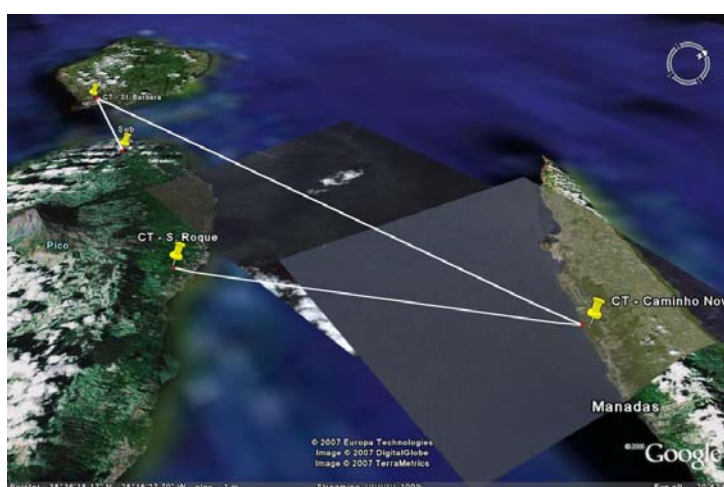


Figura 8.4 – Imagem satélite da ligação entre ilhas (perspectiva 1).

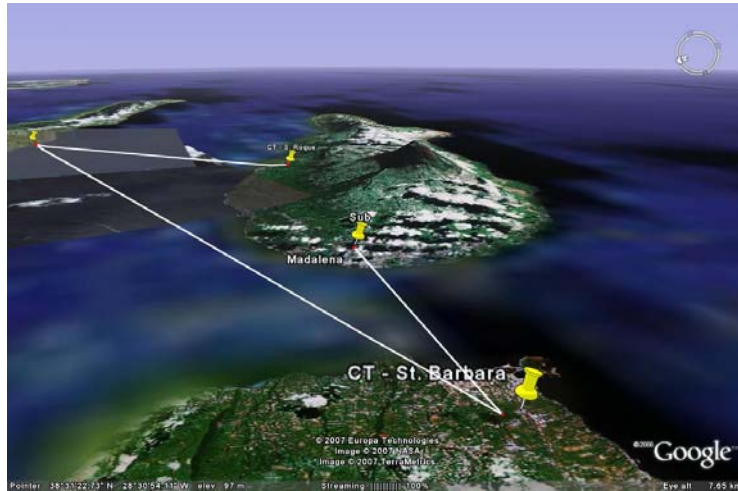


Figura 8.5 – Imagem satélite da ligação entre ilhas (perspectiva 2).

Representada a ligação, será útil calcular a sua extensão. Para efectuar esses cálculos foi necessário consultar a carta náutica da área em questão, respeitante às profundidades, bem como um programa de cálculo das distâncias reais, neste caso, o Google Earth.

Resultaram os seguintes valores:

- **Troço 1** – Ligação entre as ilhas de Pico e Faial – $2 * (1,58 + 7,947 + 2,3)$
= **23,654 km** de cabo.
- **Troço 2** – Ligação entre as ilhas de S. Jorge e Pico – $2 * (1,15 + 20,44 + 0,33) =$
43,84 km de cabo.
- **Troço 3** – Ligação entre as ilhas de S. Jorge e Faial – $2 * (1,58 + 43,02 + 0,33) =$
89,86 km de cabo.

Como a ligação vai ser projectada tendo como base o sistema bipolar, cada troço compreende 2 cabos, razão pela qual, se multiplica por 2 o comprimento dos cabos. Uma pequena parte do transporte é feita em terra, cerca de 15 km de cabo serão terrestres (9,256 %), onde será importante soterrar os mesmos. São necessários aproximadamente 160 km de cabo, para se realizar o transporte de energia.

De seguida, encontram-se esquemas elucidativos destes cálculos.



Figura 8.6 – Troço 1 entre as ilhas de Pico e Faial (o esquema não está à escala).



Figura 8.7 – Troço 2 entre as ilhas de S. Jorge e Pico (o esquema não está à escala).

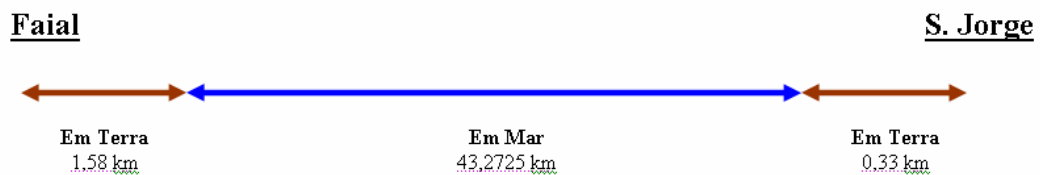


Figura 8.8 – Troço 3 entre as ilhas de S. Jorge e Faial (o desenho não está à escala).

8.3. Comparação dos Possíveis Cenários

A interligação das três ilhas pode ser feita de duas formas, que diferem da existência ou não do troço 3, sendo as variáveis preço e eficácia, muito importantes nesta análise. Para se saber o índice de eficácia é fundamental conhecer as perdas no trânsito de potência.

No cálculo das perdas, há que saber primeiramente a potência em jogo. Para determinar a carga média suportada pelos cabos da interligação, considera-se o exposto no capítulo 4, onde a central térmica a diesel de São Jorge seria inactiva, como tal há que compensar energeticamente esta ilha. A sua produção energética em 2004, proveniente do diesel é na ordem dos 22434 MWh, ao dividir pelo número de horas do ano 8760, tem-se uma potência

média de 2,56 MW. Extrapolando para o ano de 2006, com um crescimento de 8% (valor característico para o caso), obtém-se aproximadamente 3 MW.

A este valor há ainda a acrescentar a potência média transmitida entre ilhas, em caso de interrupção. Assim, há que dividir a energia total não fornecida devido às interrupções, no ano de 2006, e dividi-la pelo número de horas desse ano. A energia não fornecida calculada no capítulo 4, tem origem no sistema de transporte e produção, que se assume ser a grande causa das interrupções longas. Seguindo este raciocínio o valor da potência média que seria transmitida durante o ano de 2006, é na ordem dos 17,6 kW.

Finalmente o valor estimado de potência média a suportar pela interligação situa-se nos 3,0176 MW, valor que será muito útil para o cálculo das perdas. Neste cálculo há algumas considerações a fazer, que são as seguintes:

- A potência média calculada circula maioritariamente para a ilha de S. Jorge através dos troços 2 e 3, valor estimado de 3 / 2 MW por troço.
- A potência média que resulta das interrupções, 17,6 kW, será dividida igualmente pelos 3 troços.

Dadas estas considerações, há que saber o valor da resistência dos cabos, com secção de 500 mm², estes dados são fornecidos pela Cabelte, a resistência a 20°C é próxima dos 0,0605 Ω/km. Retirando os valores de comprimento dos cabos calculados no capítulo 8, tem-se os dados suficientes para calcular as perdas, como representa a tabela seguinte.

Tabela 8.4 – Cálculo das perdas nos vários troços.

	Troço 1	Troço 2	Troço 3
Potência média (MW)	$\frac{0,0176MW}{3} = 0,0059MW$	$\frac{3MW}{2} + \frac{0,0176MW}{3} \approx 1,51MW$	$\frac{3MW}{2} + \frac{0,0176MW}{3} \approx 1,51MW$
Corrente média (A)	$\frac{0,0059MW}{15KV} = 0,39A$	$\frac{1,51MW}{15KV} = 100,67A$	$\frac{1,51MW}{15KV} = 100,67A$
Comprimento troço (km)	11,83	21,92	44,93
Resistência (Ω)	1,43	2,65	5,44
Perdas (W) $P = R \times I^2$	0,22	26856,29	55131,4
Perdas por conversor (W)	118	30200	30200
Perdas Totais (kW)		142,51 (4,72%)	

O quadro anterior mostra que o valor das perdas totais é próximo dos 4,72%, somando as perdas nos conversores e nos cabos. Nas perdas do conversor foi considerado o valor de 1%⁸ por conversor, em relação à potência total, sem esquecer que cada trecho tem dois conversores.

O trecho 3 será o mais dispendioso de toda a interligação, já que tem um comprimento duas vezes maior que o trecho 2 e quatro vezes maior que o trecho 1, por essa razão o cálculo das perdas sem esta ligação deve ser estudada. Para o cálculo destas perdas há algumas considerações a fazer, que são as seguintes:

- A potência média calculada circula maioritariamente para a ilha de S. Jorge, a única possibilidade é através do trecho 2, o seu valor estimado é de 3 MW.
- A produção que circula para S. Jorge, é dividida entre as duas restantes ilhas, assim, no trecho 1 vai circular uma potência média de 1,5 MW (produção do Faial).
- A potência média que resulta das interrupções, 17,6 kW, será dividida igualmente pelos 2 trechos.

Tabela 8.5 – Cálculo das perdas nos vários trechos.

	Trecho 1	Trecho 2
Potência média (MW)	$\frac{3MW}{2} + \frac{0,0176MW}{2} \approx 1,51MW$	$3MW + \frac{0,0176MW}{2} \approx 3,01MW$
Corrente média por condutor (A)	$\frac{1,51MW}{15KV} = 100,67A$	$\frac{3,01MW}{15KV} = 200,67A$
Comprimento trecho (km)	11,83	21,92
Resistência de cada condutor (Ω)	1,43	2,65
Perdas (W) $P = R \times I^2$	14492,26	106711,39
Perdas por conversor (W)	30200	60200
Perdas Totais (kW)	211,6 (7,01%)	

A ausência do trecho 3, provoca um incremento nas perdas de 2,29%, que na totalidade representam 7,01% de potência em trânsito. Com a ligação em triângulo, a interligação fica mais fiável como foi exposto no capítulo 8.2, mas a relação custo/eficiência é determinante na

⁸ Segundo dados fornecidos pela ABB, www.abb.com

construção de uma ligação deste tipo, assim através dos valores anteriores é possível saber qual o valor economizado por ano, neste caso 2006. A diferença da energia das perdas nos dois casos, é de 605,23 MWh, o que tendo por base o valor de 0,14185€/kWh, que é a média ponderada das tarifas da EDA, se chega rapidamente ao valor economizado por ano, 85851,65€.

De realçar que as perdas variam com o quadrado da corrente, o que significa que não é linear trabalhar com valores médios. Além disso, o cálculo correcto da potência de perdas nas situações mais gravosas, é traduzido pela seguinte equação.

$$P_{Perdas} = \frac{1}{T} \int R.I^2 dT$$

Equação 8.1

Assim, as perdas médias não se calculam através da corrente média mas pelo integral da corrente, o neste caso não é possível, já que não se pode determinar a fórmula da corrente. Os valores correctos seriam mais elevados, isto é, nestes raciocínios no dimensionamento das perdas, deve-se atender não aos valores médios mas sim aos valores máximos. Por esse facto, nestes cálculos é cometido um erro, sendo estes apenas um valor aproximado.

9. Simulação

No presente capítulo o sistema em estudo vai ser simulado no programa MatLab/Simulink. Apesar disso, toma-se conhecimento do comportamento das variáveis mais importantes num sistema deste tipo. A figura seguinte esquematiza na simulação.

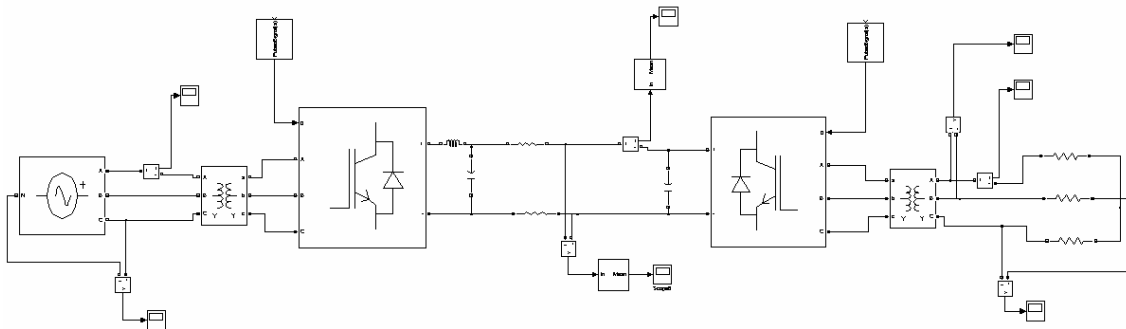


Figura 9.1 – Esquema do circuito simulado.

Para representar a rede de cada ilha, recorreu-se a uma fonte de tensão alternada sinusoidal, com amplitude composta de 15 kV, valor eficaz; existem também dois transformadores de 25 MVA, com o primário em estrela e o secundário em triângulo. Os onduladores, de três braços, são compostas por IGBT's e diodos em anti-paralelo, com resistência interna na condução de 1 m Ω .

Neste capítulo, admite-se que o gerador de tensão é uma fonte ideal; também se considera o mesmo comportamento em relação aos elementos semicondutores, sendo assim interruptores ideais, apresentando uma impedância infinita no estado de bloqueio e com comutações instantâneas. Os cabos de ligação entre os onduladores têm uma resistência de 2 Ω , valor considerado razoável tendo em conta os cálculos do capítulo 8.

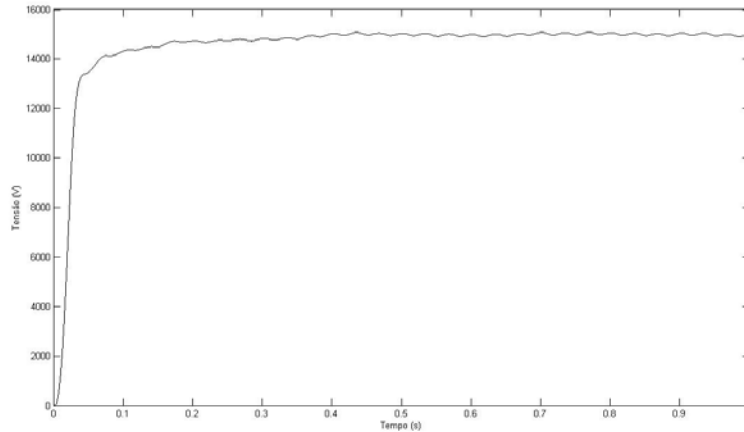


Figura 9.2 – Forma de onda da tensão contínua entre ambos os condutores, valor médio.

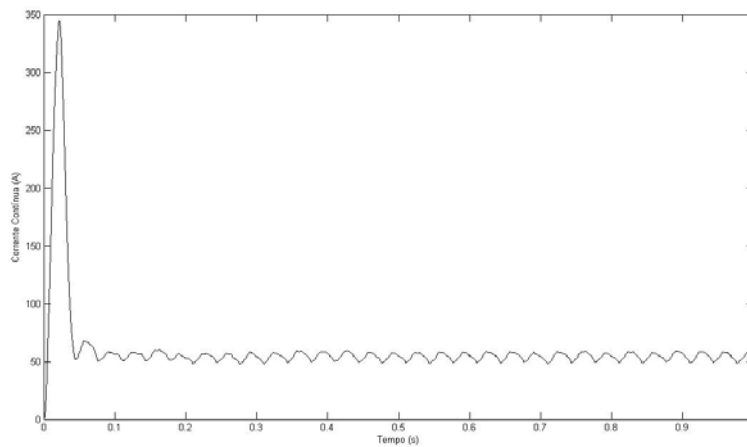


Figura 9.3 – Forma de onda da corrente no circuito contínuo, valor médio.

A tensão entre os condutores do circuito contínuo tem um valor médio estável durante a transmissão, na ordem dos 15 kV, como é perceptível no gráfico. Em relação à corrente, apresenta um valor médio próximo de 220 A, resultado do trânsito de potência imposto neste circuito.

Nesta simulação foram usados dois condensadores no circuito contínuo, que funcionam com filtros DC, reduzindo as harmónicas e alisando o valor da tensão. Além destes componentes, na saída do ondulator existe também uma bobine, denominada de reactor DC, que contribui para suavizar a corrente e proteger o ondulator das oscilações imprevistas.

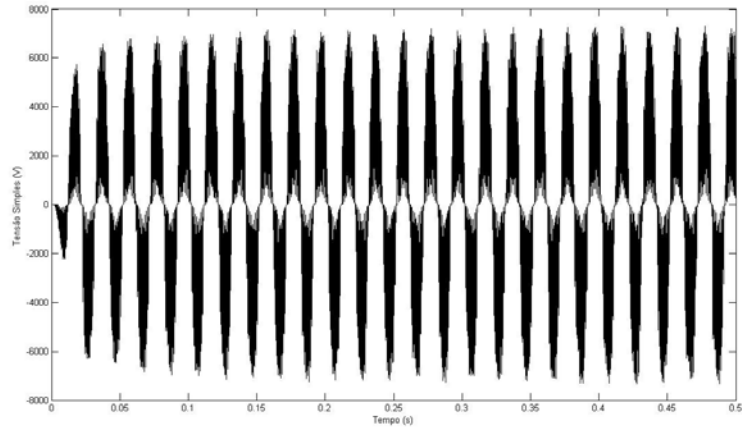


Figura 9.4 – Forma de onda da tensão na carga, circuito alternado.

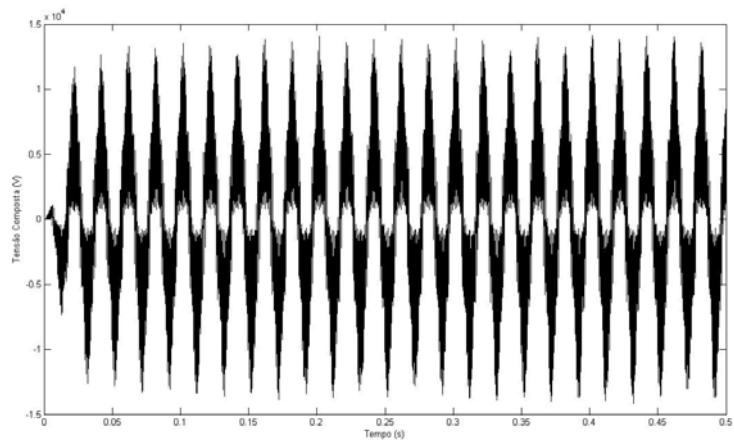


Figura 9.5 – Forma de onda da tensão composta, circuito alternado.

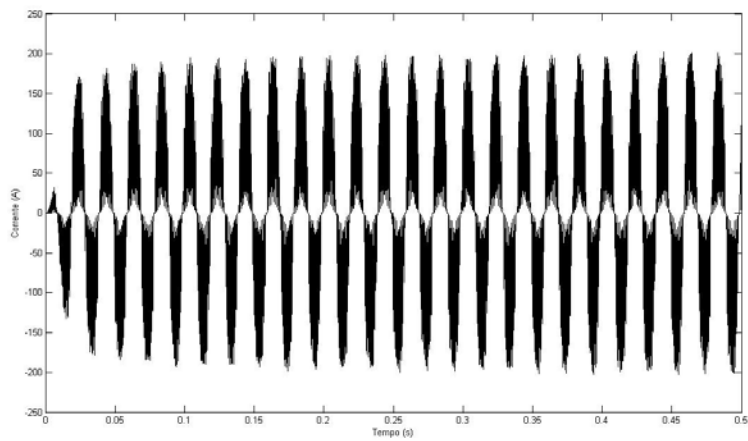


Figura 9.6 – Forma de onda da corrente na carga, circuito alternado.

No extremo da ligação foram colocadas três cargas, com uma potência de 2MW cada, que impuseram a transferência de potência vinda do circuito contínuo. As formas de onda da corrente e tensão alternada, acima representadas, poderiam ter uma forma mais sinusoidal se fosse usado um filtro AC na saída do ondulator, como de seguida é demonstrado.

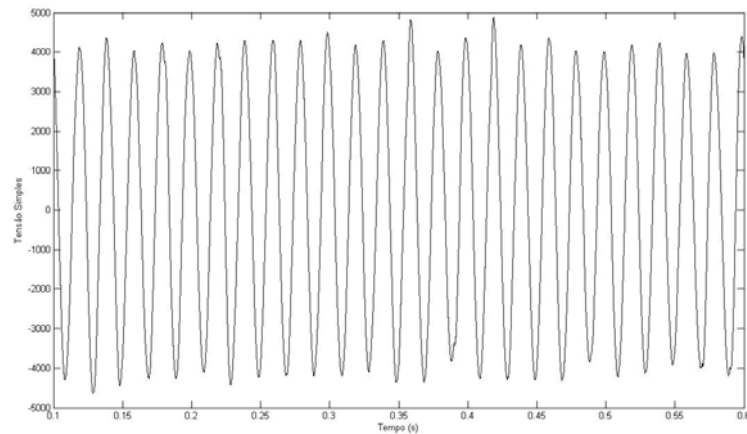


Figura 9.7 – Forma de onda da tensão na carga com filtro LC, circuito alternado.

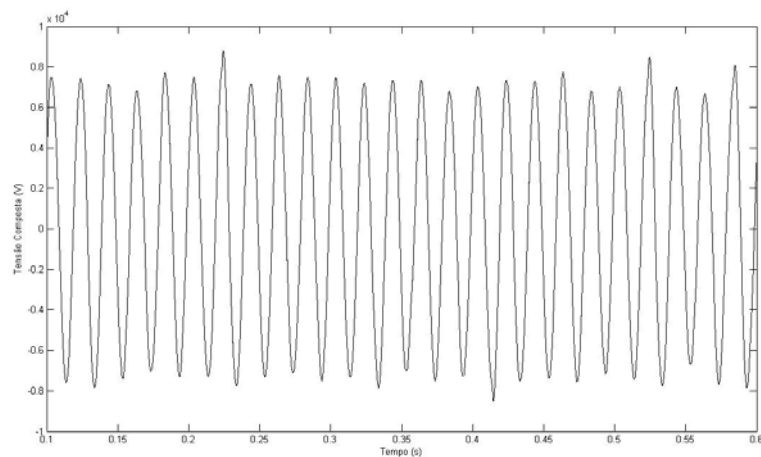


Figura 9.8 – Forma de onda da tensão composta com filtro LC, circuito alternado.

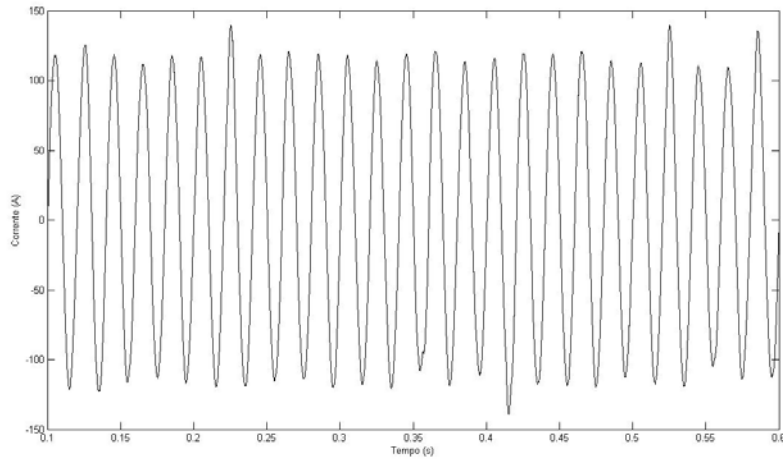


Figura 9.9 – Forma de onda da corrente na carga com filtro LC, circuito alternado.

A importância do filtro AC fica bem comprovada, já que confere às formas de onda um aspecto mais sinusoidal, eliminando muitas das suas harmônicas. Este filtro é composto essencialmente por uma bobine e um condensador, como foi descrito no capítulo 6. O seu posicionamento é evidenciado na figura seguinte.

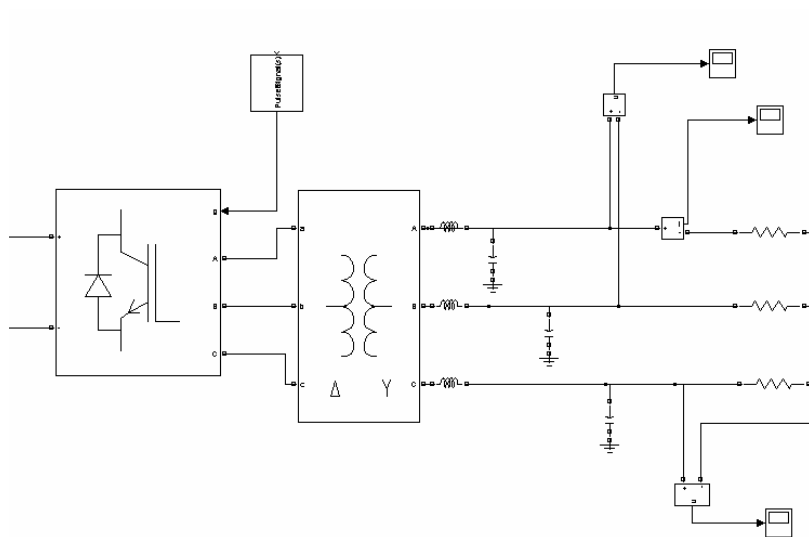


Figura 9.10 – Posicionamento do filtro AC.

10. Conclusões

10.1. Resumo dos Capítulos

Os parágrafos seguintes apresentam um resumo do conteúdo mais relevante dos vários capítulos desta memória. No capítulo 2, em que são apresentados os aspectos mais importantes de uma rede interligada, fica demonstrado, por exemplo, o incremento na qualidade de energia, já que, é notória a instabilidade nas redes eléctricas das ilhas, onde as interrupções longas anuais rondam as 400 e muitas delas com origem na produção. Em relação aos aspectos importantes na realização projecto, salienta-se a protecção do meio ambiente e escolha dos pontos de ligação.

No capítulo 3 é retratada a situação actual das 3 ilhas em estudo, onde se notabiliza o elevado crescimento do consumo de energia eléctrica, cerca de 8% contra os 5% de Portugal Continental, o que conduz ao constante reforço do sistema produtor. Também há a referir a pouca implementação das energias renováveis nas três ilhas, 14% da produção eléctrica de S. Jorge (Parque Eólico do Pico da Urze) e 6% da ilha do Faial (Parque Eólico de Lomba dos Frades). A produção hídrica nas três ilhas é praticamente nula, já que, corresponde a 1% da produção no Faial, segundo fonte da EDA no ano de 2005.

O capítulo 4 que calcula a variação nos custos de produção com a realização do projecto aqui em estudo, designadamente os custos relacionados com os combustíveis, custos fixos inerentes ao funcionamento das centrais em estudo e custos da energia não fornecida no ano de 2006. Em relação ao custo variável, conclui-se que se produção diesel fosse retirada e compensada com produção térmica a fuelóleo, ter-se-ia poupado 1M€ no ano de 2005. No que diz respeito ao custo fixo, os grupos a diesel que seriam desactivados representaram um encargo de 220 000€, no ano de 2005. Por fim, a energia não fornecida, representou em 2006, 22 000€ que deixaram de facturados. Estas somas, dão uma ideia do que poderá ser investido no projecto.

No capítulo 5, são apresentados os valores de potência a transitar, que são importantes no dimensionamento do equipamento a utilizar. Com base nas taxas de crescimento e pontas de consumo fornecidas pela EDA, obtém-se para a ilha do Pico uma potência de ponta máxima perto dos 16 MW, na ilha de São Jorge a ponta máxima será cerca de 8 MW e por fim na ilha do Faial aproximadamente 20 MW. Estes valores foram dimensionados para um crescimento do consumo nos próximos 10 anos e serão importantes no cálculo do trânsito de potência, no cenário mais desfavorável.

O capítulo 6, considera que o melhor tipo de ligação para o caso em estudo será a bipolar, permitindo o trânsito de potência bidireccional. Em relação ao principais constituintes da interligação, de destacar o uso de IGBT's nos onduladores e a sua associação em série e paralelo para atingir os índices de potência pretendidos. O primário dos transformadores deve ser ligado em estrela, enquanto que o secundário terá dois enrolamentos, um em estrela e outro em triângulo.

Em relação à tensão entre os condutores, o valor considerado razoável é de 15 kV, já que a corrente não se torna muito elevada para os valores de potência desejados. Além disso, para este tipo de transmissão o valor é pouco elevado, o que não torna problemática a construção dos onduladores. No filtro AC de mencionar que o aumento do índice de pulsação do ondulador, facilita a eliminação das harmónicas através de condensadores de baixa impedância, já que a sua frequência sobe.

Este capítulo refere também as vantagens de uma transmissão em corrente contínua, nas quais há um facto importante, que consiste na redução aproximada das perdas em dois-terços⁹ de uma transmissão DC quando comparada com um sistema AC. Além disso, este sistema possui uma boa resposta dinâmica na transmissão de potência, e a sua adição à rede das três ilhas não faz aumentar a potência de curto-circuito existente.

Já o capítulo 7 que aborda mais em profundidade o funcionamento do ondulador, considera que no comando do ondulador, a modulação adoptada será por largura de impulso, PWM, mais exactamente a modulação síncrona de três níveis sinusoidal. Este capítulo conclui também, que o índice de modulação e pulsação são de extrema importância no funcionamento do ondulador, sendo o ângulo de potência e a amplitude da tensão de saída, determinantes no trânsito de potência.

O capítulo 8 analisa a constituição dos cabos a utilizar e salienta a secção de 500 mm² do condutor, que permite correntes na ordem dos 1000 A. O condutor deve também ser fabricado com uma construção estanque. No que respeita ao material isolante, o mais utilizado e com melhores características técnicas é o polietileno reticulado, sendo por isso aconselhado. Em relação à armadura, nas zonas submarinas será aconselhável o uso de fios de aço de modo a reforçar a armadura e nas áreas da interligação onde se atinge grandes profundidades será ainda aconselhável a utilização de duas camadas de armadura, com respectiva bainha de PVC.

A dimensão dos cabos a utilizar neste transporte é calculada neste capítulo e ronda os 160 km, se forem construídas três ligações entre as ilhas. A interligação das ilhas pode ser feita

⁹ Como vem referido no capítulo 5 do livro de Muhammad H. Rashid, "Power Electronics".

de duas formas, que diferem da existência ou não do troço 3, a diferença entre estes dois cenários em relação à energia desperdiçada nas perdas, é de 605,23 MWh, o que tendo por base o valor de 0,14185€/kWh, se chega rapidamente ao valor economizado por ano, 85851,65€, se forem construídos os três troços. Estes valores foram conseguidos segundo os simplificados processos de cálculo, retratados neste capítulo.

No capítulo 9, foi feita uma pequena simulação do equipamento em estudo, onde são retratadas as formas de onda da tensão e corrente nas diferentes fases da transmissão. Todos estes resultados foram coincidentes com o esperado nas análises teóricas.

10.2. Conclusões Gerais

O documento aqui exposto tem como objectivo principal a análise técnico/económica dos vários aspectos da interligação. Assim, há a separar duas questões fundamentais: “A interligação traz benefícios que retribuem o investimento feito?”; “O tipo de transmissão deve ser em corrente contínua?”.

No que diz respeito à primeira questão, a análise simplesmente económica demonstra que a interligação é rentável. Com base no Relatório de Contas da EDA de 2005 de 09/08/2006, a soma dos investimentos em centrais de reserva no Bloco Central dos Açores rondou os 9,5 Milhões de euros, com a interligação em estudo estes investimentos seriam reduzidos, senão mesmo dispensáveis, já que em todas as ilhas existem grupos geradores de reserva devido às pontas de consumo e avarias. Além disso, estima-se no Capítulo 4 que a interligação conduziria à poupança anual de aproximadamente 1,24 Milhões de euros. Estando o custo da interligação situado entre os 11,16 Milhões de euros e os 14,4 Milhões de euros, como será demonstrado de seguida, facilmente se conclui que este investimento teria um retorno rápido.

O custo de uma ligação deste género ronda os 310 – 400 k€/MW¹⁰, investimento algo dispendioso se forem feitas as três ligações. Como foi demonstrado no capítulo 5, a interligação foi dimensionada para suportar um crescimento do consumo nos próximos 10 anos, assim sabe-se para cada troço a potência a instalar.

O troço 1 liga a ilha de Pico e Faial e como a ilha do Faial poderá vir a ter uma potência de pico na ordem dos 20 MW, o equipamento deste troço deve estar preparado para esta potência, em caso de falha do troço 3. O troço 2 une a ilha de Pico e São Jorge, como a ilha do

¹⁰ Segundo dados fornecidos pela ABB, www.abb.com

Pico poderá ter uma potência de pico na ordem dos 16 MW, o equipamento deve estar pronto para esta potência, em caso de falha do troço 1. O troço 3 liga a ilha de São Jorge e Faial, como a ilha do Faial poderá vir a ter uma potência de pico na ordem dos 20 MW, o equipamento deste troço deve estar preparado para esta potência, em caso de falha do troço 1.

Contas feitas, o somatório das três ligações ronda os 17,36 – 22,4 Milhões de euros, foram considerados os preços de construção entre 310 – 400 k€/MW, uma vez que a interligação em estudo tem uma capacidade de transporte baixa, relativamente à maior parte das construções da ABB.

Com a retirada do troço 3, o preço de construção da interligação diminuía para os 11,16 – 14,4 Milhões de euros, valor bastante abaixo do inicial, e que deve considerado, uma vez que o poupança anual com este troço a nível de perdas é de 85851,65€/ano, considerando o ano de 2006. Pelo que, a construção do troço 3 não é considerada rentável, ainda que seja importante para o aumento da fiabilidade da rede.

A rede das três ilhas ligadas entre si, traria de certo incrementos significativos na qualidade de energia de uma população de 40 000 habitantes, que sofre todos os anos interrupções longas na ordem das várias dezenas. As ilhas têm tido nos últimos anos um forte crescimento do consumo de energia, assim, a sua interligação é uma hipótese que deve ser seriamente ponderada, motivada pelo incremento da qualidade de energia e diminuição dos custos.

Em relação à escolha da transmissão em corrente contínua, a evolução desta tecnologia tem tornado este sistema cada vez mais competitivo em relação ao sistema alternado, nomeadamente no controlo do trânsito de potência, reduzidas perdas de transmissão, menos equipamentos na compensação de potência reactiva e ausência do incremento de potência de curto-circuito. Assim, esta opção é nos dias de hoje totalmente fiável e apropriada para o caso.

Para além das razões anteriormente expostas, o capítulo 6 deste trabalho refere que as perdas numa transmissão em corrente continua são reduzidas em aproximadamente dois terços. Tendo como fundamento o valor das perdas do capítulo 8, sem a existência do troço 3, a energia de perdas com um sistema alternado teria um incremento de 3,76 GWh no ano considerado. Assim, uma transmissão em corrente contínua, tem ganhos num ano de aproximadamente 533 356€, considerando o valor de 0,14185€/kWh.

10.3. Acções Futuras

Este ante-projecto permite visualizar o interesse da interligação, para a qual a indústria nacional poderá ter alguns problemas na sua concretização, nomeadamente dificuldades na construção dos onduladores, na montagem de duas armaduras nos cabos e na deposição dos mesmos no fundo do mar, uma vez que poderá ser necessário o uso de maquinaria própria. A deposição natural dos cabos no mar poderá ter alguns problemas, onde há a possibilidade do estudo dos movimentos no fundo do oceano.

Apesar dos resultados obtidos, o trabalho apresentado é apenas um abrir de portas para a concretização da interligação em estudo, ficando ainda por analisar, testar e concluir muitos aspectos técnicos: comportamento dos onduladores e restantes componentes em vários cenários; dimensionamento dos constituintes que foram estudados; análise do comando que implementará o PWM proposto e estudo detalhado da arquitectura dos onduladores.

REFERÊNCIAS

- [RARI_EDA_2005] Caracterização das Redes de Transporte e Distribuição de Energia Eléctrica da Região Autónoma dos Açores, EDA, S.A. – Electricidade dos Açores, 31 de Dezembro de 2005.
- [ABB_HVDC] Technical description of HVDC Light® technology, ABB Power Technologies AB, 2006-02, www.abb.com/hvdc
- [Muhammad] Muhammad H. Rashid, Capítulo 5 do livro *Power Electronics*, Academic Press (USA), 2001.
- [Labrique] Francis Labrique, João Santana, *Electrónica de Potência*, Fundação Calouste Gulbenkian, 1991.
- [JSantana] João J. E. Santana e Maria José Resende, *Reflectir Energia*, Edições Técnicas e Profissionais (ETEP), Setembro de 2006.
- [EDA_RQS] Relatório de Qualidade de Serviço, EDA, S.A. – Electricidade dos Açores, 31 de Maio de 2007.
- [ERSE] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, <http://www.erse.pt>
- [EDA] Electricidade dos Açores, <http://www.eda.pt>
- [HVDC_Arizona] Incorporating HVDC Power Transmission into System Planning, Division of Electric Energy Systems, United States Department of Energy, Phoenix – Arizona, 1980
- [Power_Electronics] Philip T. Krein, Capítulo 6 do livro *Elements of Power Electronics*, Oxford University Press, 1998
- [REN] Cenários de Evolução da Procura de Electricidade em Portugal Continental Período 2006-2030, REN – Rede Eléctrica Nacional, Junho de 2006.
- [Cabelte] Cabelte, Cabos Eléctricos e Telefónicos SA, www.cabelte.pt
- [Farhad] Farhad Nozari e Hasmukh S. Patel, *Power Electronics in Electric Utilities: HVDC Power Transmission Systems*, Vol. 76 Nr.4, IEEE, 1988.
- [Arrillaga] J. Arrillaga, *High Direct Current Transmission*, Peter Peregrinus, UK, 1990
- [FSilva] José Fernando Alves Silva, *Electrónica Industrial*, Fundação Calouste Gulbenkian, 1998.
- [RQS] Relatório da Qualidade de Serviço.

ANEXOS

A. ESQUEMA DO PERCURSO DOS CABOS

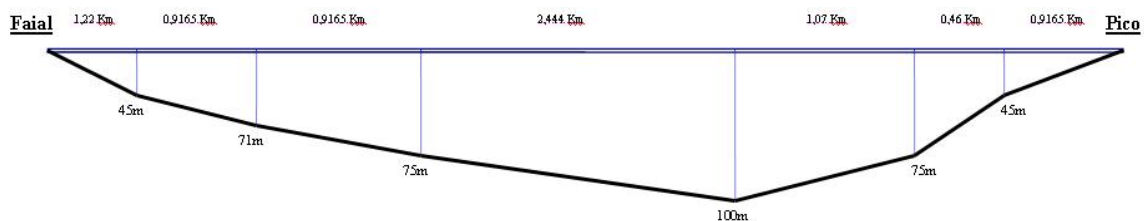


Figura A.1 – Troço marítimo 1 entre as ilhas de Pico e Faial.
(O desenho não está à escala)

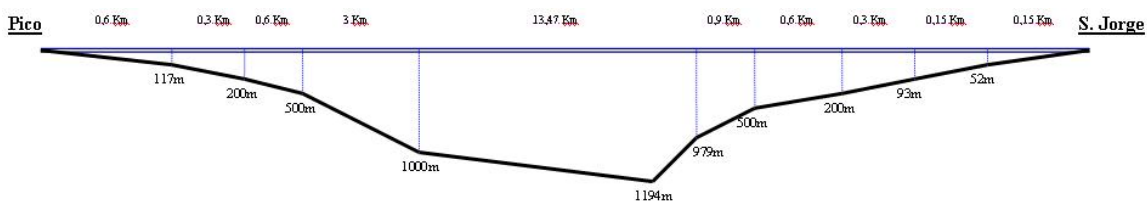


Figura A.2 – Troço marítimo 2 entre as ilhas de S. Jorge e Pico.
(O desenho não está à escala)

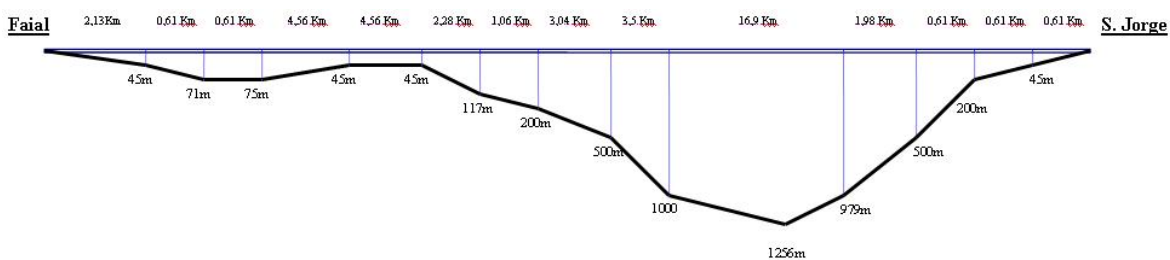


Figura A.3 – Troço marítimo 3 entre as ilhas de S. Jorge e Faial.
(O desenho não está à escala)

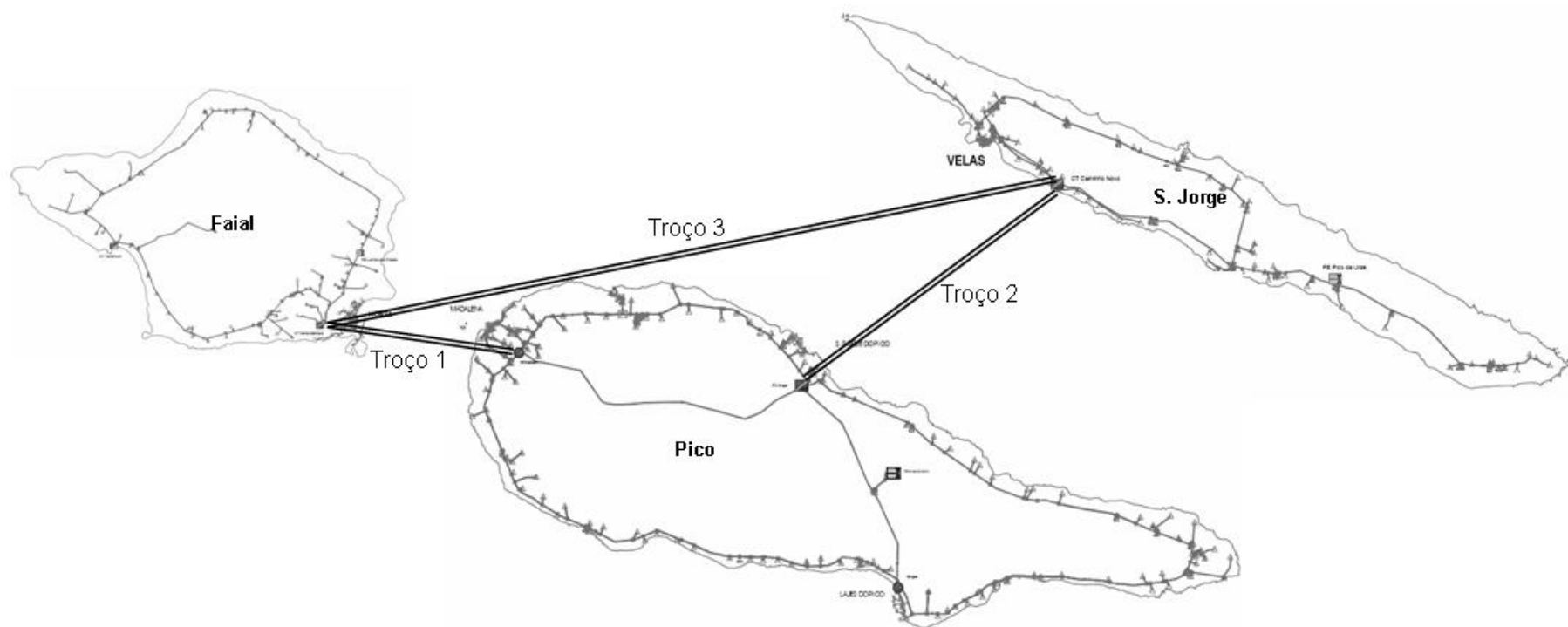


Figura A.1-2 – Ligação das ilhas do Bloco Central através de cabos submarinos.

B. ESBOÇO DA AVALIAÇÃO DE IMPACTE AMBIENTAL DA INTERLIGAÇÃO

Um impacte em Avaliação Ambiental é definido como a alteração, positiva ou negativa, resultante do efeito de uma acção humana sobre uma determinada componente física, ecológica, cultural, social ou económica, num determinado período de tempo e num dado lugar ou espaço geográfico, comparada com a situação que ocorrerá se essa acção não vier a ter lugar.

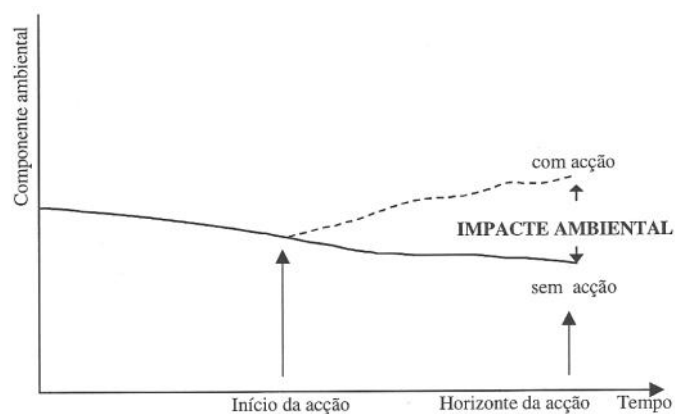


Figura B.1 – Um impacte.

Neste projecto, a Avaliação de Impacte Ambiental (AIA), será muito provavelmente requerida pelas Autoridades competentes, e terá como objectivo um conjunto de pressupostos que de seguida se enumeram

:

- Assegurar que o ambiente é explicitamente considerado e incorporado no processo de tomada de decisão sobre propostas de desenvolvimento;
- Antecipar e evitar, minimizar ou compensar os efeitos adversos significativos – biofísicos, sociais e outros relevantes – de propostas de desenvolvimento;
- Proteger a produtividade e a capacidade dos sistemas naturais e dos processos ecológicos que mantêm as suas funções;
- Promover um desenvolvimento que seja sustentável e que optimize o uso dos recursos e as oportunidades de gestão;
- Fornecer aos decisores informação sobre as implicações ambientais significativas de determinadas acções propostas;
- Sugerir modificações da acção, tendentes à eliminação dos impactes potenciais adversos e potenciação dos impactes positivos;
- Indicar os meios de minimização dos impactes potenciais inevitáveis.

O processo de Avaliação de Impacte Ambiental, é composto por diversas fases. A primeira é denominada Selecção de Projectos, onde se vai decidir se este projecto é submetido a AIA, sendo quase certo que seja admitido, devido à sua categoria, localização e dimensão.

O próximo procedimento tem por nome Definição do Âmbito, o seu objectivo é a identificação e selecção das questões ambientais significativas, que podem ser potencialmente afectadas pelo projecto e que deverão ser analisadas. Seguidamente será elaborado o Estudo de Impacte Ambiental (EIA), sendo da responsabilidade do promotor do projecto neste caso a EDA, que deverá conter:

- Descrição do projecto e das alternativas;
- Descrição do estado actual do ambiente potencialmente afectado;
- Identificação e previsão de impactes;
- Mitigação e gestão de impactes;
- Avaliação dos impactes residuais (impactes não passíveis de ser compensados);
- Programa de monitorização (programa de acções sistemáticas de observação, medição e registo).

A fase seguinte deste processo, será a Apreciação Técnica do EIA, esta observação é da responsabilidade da entidade que administra o processo de AIA. Neste seguimento a Decisão é proferida, que incluirá as alternativas e condições em que o projecto pode ser aprovado, é emitida a Declaração de Impacte Ambiental (DIA).

Em simultâneo com Projecto de Execução ocorre a próxima etapa da AIA, a Pós-Avaliação I, com o objectivo de demonstrar o cumprimento das determinações constantes da DIA. Por fim, a fase final da AIA é intitulada de Pós-Avaliação II, onde será proferido o Relatório de Monitorização, que deve avaliar entre outras coisas, a resposta do sistema ambiental, a eficiência das medidas de mitigação e detectar impactes inesperados.

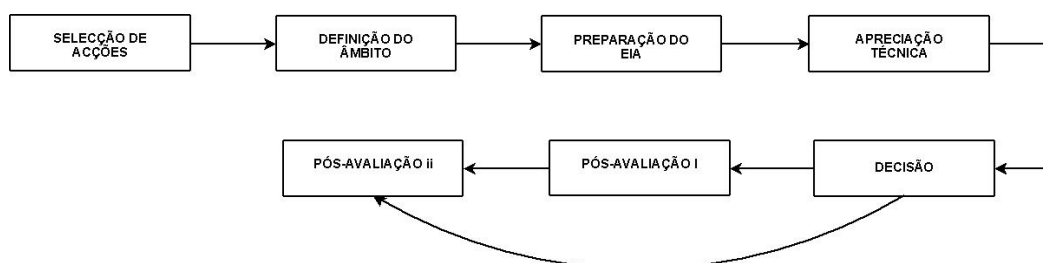


Figura B.2 – Processo geral de AIA em Portugal.

Numa avaliação deste tipo, é essencial a participação pública, esta tem por objectivo assegurar que seja devidamente representado no processo de decisão o modo como o público potencialmente afectado por este projecto valoriza os respectivos impactes ambientais e sociais. A figura seguinte retrata um anúncio de uma “Consulta Pública”, efectuada no Algarve a propósito de uma linha de Alta Tensão.

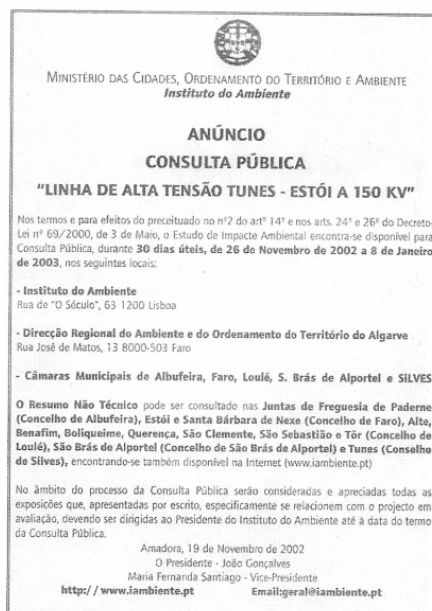


Figura B.3 – Exemplo de um anúncio de uma “Consulta Pública” de um procedimento de AIA em Portugal (anúncio publicado no *Jornal do Algarve*, 2002-11-20).

O proponente desta obra, a EDA, na selecção da empresa que vai elaborar o EIA, pode seguir critérios que ajudem no seu sucesso. Um desses critérios é a credibilidade da empresa em questão, associada à sua especialidade/experiência no ramo. É também importante questionar a disponibilidade e capacidade da mesma para realizar o estudo, bem como, o custo deste.

Impactes Sectoriais e Medidas de Mitigação

A elaboração do Estudo de Impacte Ambiental, vai abordar inúmeras questões na componente física, ecológica, cultural, social ou económica do projecto de interligação. Os parágrafos seguintes vão referir, de forma sucinta, os vários tipos de impacte nos diversos sectores.

Os primeiros a serem estudados são os impactes na geologia e geomorfologia, aqui pode haver durante a fase de construção erosão do solo, agravamento dos riscos geológicos e perturbação do enquadramento visual. Assim, se necessário na fase de projecto poderá haver

alternativas de localização nas ligações entre ilhas; na fase de construção, podem ser necessárias obras de defesa costeira e alternativas de soluções técnicas, de modo ao aproveitamento mais eficiente dos recursos e faseamento de utilizações do território. Para compensar os impactes residuais, salienta-se a valorização de geomonumentos e medidas de recuperação adoptadas noutros locais.

Em relação ao sector da hidrologia e recursos hídricos, podem ocorrer impactes no escoamento da água subterrânea, na compactação do solo e alterações na cobertura vegetal que podem aumentar o escoamento superficial. Por isso, na fase de construção as técnicas usadas devem salvaguardar estas componentes físicas e se necessário na fase de projecto deverá haver alternativas de localização.

No que diz respeito ao solo abrangido por este projecto, há a possibilidade de aumentar a erosão e alteração das características físico-químicas e microbiológicas do mesmo, pelo que, na fase de obra serão necessárias técnicas e procedimentos com menor impacte, controlo de descargas poluentes, reaproveitamento de solos, e possível recuperação de solos degradados para compensar os efeitos causados.

A biodiversidade pode ser também afectada pela realização desta transmissão, porque é possível haver danificação de habitats, perturbação de espécies, mortalidade directa e nas zonas costeiras pode ocorrer eutrofização marinha. Por isso, na fase de construção deve haver controlo de acesso a áreas sensíveis e manuseamento adequado de terras. As medidas de projecto devem assentar em soluções de alteração da localização; preservação de habitats; redução da poluição, erosão e escoamento.

No que respeita à qualidade da água, esta pode apresentar uma poluição pontual e difusa, com contaminação microbiológica, poluição térmica e salinização nas zonas costeiras. Pelo que, deve haver controlo de pontos poluentes, localização das descargas e planos de emergência para derrames acidentais.

A qualidade do ar na fase de construção pode ser afectada, devido à emissão de partículas, assim deve haver humedecimento de superfícies responsáveis por emissões de poeiras e cobertura de áreas de trabalho. Na paisagem não haverá impactes significativos, uma vez que os cabos são subterrâneos, e não existe a introdução de elementos novos na paisagem.

A realização deste projecto teria impactes económicos positivos, já que iriam haver alterações no emprego, na actividade empresarial, nos lucros e nos rendimentos da região em causa. A nível social os impactes seriam também indiscutíveis, devido às alterações na dimensão populacional (temporária e permanente).