

# **Dimensionamento de Sistemas de Compensação do Fator de Potência com Filtragem Passiva de Harmónicos**

**Paulo Alexandre Braga de Sá**

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia  
Electrotécnica - Sistemas Eléctricos de Energia**

Orientador: Professor Doutor Fernando Manuel Domingues Fernandes

Porto, Novembro 2013



## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus pais por todo o apoio que me deram durante estes anos mesmo durante os momentos mais difíceis.

Gostaria de agradecer ao Professor Doutor Francisco Manuel Domingues Fernandes pela sua orientação na elaboração deste trabalho.

Também não poderia deixar de agradecer ao Engenheiro Henrique Jorge de Jesus Ribeiro da Silva por ter despertado em mim o gosto pela área dos sistemas de energia quando foi meu professor na Licenciatura em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores.

Um grande obrigado ao meu colega e amigo Rui Almeida por ter sido a pessoa que mais me ensinou e ajudou na operação e instalação de sistemas de compensação de energia reativa e de analisadores avançados de energia.

Por último tenho de agradecer a todos aqueles que me colocaram questões às quais eu não sabia responder, pois foram eles que me fizeram procurar essas mesmas respostas enriquecendo o meu processo de aprendizagem.



## **Resumo**

A eficiência energética tem um papel de importância crescente devido a questões ambientais e ao aumento dos custos energéticos. Recentemente foram tomadas medidas para regular o consumo e o fornecimento de energia reativa em Portugal, que tornaram mais rigorosas as condições de faturação. O custo crescente da energia e a implementação das *smart grids* apontam para um futuro de maior rigor sobre a utilização da energia reativa. Não será de estranhar que as regras de faturação sejam mais severas daqui a uns anos.

O desenvolvimento tecnológico nas áreas da análise da energia e nas formas de controlo da compensação de energia reativa permitem resultados muito mais eficazes que aqueles apresentados pelos vulgares sistemas a contactores que constituem a maioria dos cenários. Apesar de terem um custo inicial superior, os sistemas de compensação do fator de potência com filtragem passiva de harmónicos, desde que projetados corretamente, trazem vantagens evidentes na sua exploração a longo prazo.

Com este trabalho pretende-se promover a sensibilização para o uso de sistemas mais eficientes na compensação de energia reativa e para que estes sejam projetados mais à medida das necessidades de cada local. Também se demonstra a extrema importância da adequação destes sistemas à qualidade de energia do local, principalmente em termos de conteúdo harmónico. Desta forma, os sistemas serão mais flexíveis em termos de utilização e possibilitam a sua adaptação às necessidades mesmo que as regras de faturação de energia reativa se tornem mais rigorosas.

## **Palavras chave**

Energia reativa; Qualidade da energia; MT; BTE, Tiristor, Indutor.



## **Abstract**

Energy efficiency has a more important role due to environmental issues and the rise of energy costs. Measures were taken recently in Portugal to regulate reactive energy consumption and supply, which made invoicing conditions stricter. The increasingly energy costs and smart grid implementation head us to a more rigorous future regarding reactive energy use. Therefore, shouldn't be a surprise if reactive energy invoicing conditions become more severe in a few years.

Technological development in power analysis and reactive energy compensation control systems allow much better results than ordinary contactor systems which represent the majority of situations. Despite a higher cost in the beginning, reactive energy compensation systems with passive filters, for as long as they are projected correctly, will bring clear advantages in the long term.

With this dissertation, it is intended to promote the awareness for the use of more efficient reactive energy compensation systems and for those to be designed to suit the necessities of each installation. It is also demonstrated the high importance of suiting these systems to the installation's power quality conditions, especially regarding harmonic distortion. This way, reactive power compensation systems will be more flexible to the necessities of each customer even if reactive energy invoicing regulations become stricter.



# Índice

Agradecimentos .....	iii
Resumo.....	v
Abstract .....	vii
Lista de Figuras .....	xiii
Lista de Tabelas .....	xvii
Acrónimos .....	xix
1. Introdução.....	1
1.1 - Enquadramento .....	1
1.2 – Motivação.....	1
1.3 - Estrutura.....	2
2. Noções teóricas .....	5
2.1 - Potência.....	5
2.1.1 - Potência Ativa .....	6
2.1.2 - Potência Reativa.....	6
2.1.3 - Potência Aparente.....	7
2.2 - Fator de Potência .....	8
2.3 - Qualidade da Energia .....	10
2.3.1 - Cavas de Tensão.....	10
2.3.2 - Sobretensões e Subtensões .....	10
2.3.3 - Transitórios .....	11
2.3.4 - Flutuações de Tensão ( <i>Flicker</i> ).....	11
2.3.4 - Desequilíbrios de tensão.....	11
2.3.5 - Harmónicos .....	12
3. Legislação .....	15
3.1 - Consumidores .....	15
3.1.1 - Despacho nº 18413-A/2001.....	15
3.1.2 - Proposta de Alteração das Regras de Facturação de Energia Reactiva – Novembro 2009.....	15
3.1.3 - Contradições .....	16
3.1.4 - Despacho nº 7253/2010 e Despacho nº12605/2010 .....	17
3.2 - Produtores.....	18
3.2.1 - RNT .....	18
3.2.2 - RND .....	19

3.3 - Tarifários .....	19
4. Tecnologias existentes .....	23
4.1 - Condensadores.....	23
4.1.1 - Condensadores de Baixa Tensão.....	23
4.1.2 - Condensadores de Média Tensão .....	33
4.2 - Métodos de implementação .....	35
4.2.1 - Grupos fixos .....	35
4.2.2 - Tipos de controlo .....	36
4.3 - Filtragem de harmónicos .....	44
4.3.1 - Filtros passivos .....	44
4.3.2 - Filtros ativos .....	51
5. Métodos de cálculo ou estimativa da potência a compensar .....	55
5.1 - Método académico .....	55
5.2 - Método simplificado através de fatura.....	57
5.2.1 - Instalações BTE.....	58
5.2.2 - Instalações MT .....	58
5.3 - Medições .....	59
6. Análise de Aplicações Diversas para Sistemas de Compensação de Potência Reativa e Formas Alternativas de Correção do Fator de Potência. ....	63
6.1 - Construção de um Túnel .....	63
6.2 - Montanha Russa .....	64
6.3 - Sistemas Assimétricos .....	67
6.4 - Parque Eólico.....	67
6.5 - Parque Fotovoltaico .....	68
6.6 - Iluminação .....	71
7. Dimensionamento, Processo de Fabrico e Instalação do Caso de Estudo.....	75
7.1 - Medições .....	75
7.2 - Potência e Resolução .....	76
7.3 - Instalação, Cabos e Proteção .....	82
7.4 – Escolha de Condensadores.....	85
7.4.1 - Dimensionamento sem influência dos indutores. ....	85
7.4.2 - Dimensionamento com influência dos indutores .....	86
7.5 - Dimensionamento dos Indutores .....	88
7.5.1 - Grupo 50kVAr.....	88

7.5.2 - Grupos 100kVAr .....	91
7.5.3 - Montagem e testes .....	94
7.6 - Módulos de comutação .....	94
7.7 - Armário, Índice de Proteção e Disposição dos Elementos.....	95
7.8 - Controlador .....	96
7.9 - Parametrização .....	97
7.10 - Detecção de Erros e Testes Finais.....	98
8. Conclusões.....	101
Referências.....	103
Anexos.....	105



## Lista de Figuras

Fig. 2.1 - Triângulo das Potências. [2] .....	7
Fig. 2.2 - Acréscimo da Potência Aparente devido à existência de harmônicos. [4] .....	8
Fig. 2.3 - Degradação do Fator de Potência Real face ao aumento da Distorção Harmónica Total da Corrente. [5] .....	8
Fig. 2.4 - Representação fasorial das tensões simples e compostas.....	11
Fig. 2.5 - Espectro harmónico em percentagem, até à ordem 15.....	13
Fig. 2.6 - Gráfico com os valores da corrente do 5º harmónico.....	14
Fig. 4.1 - Condensador Electronicon seco de baixa tensão. [18] .....	23
Fig. 4.2 - Condensador MKP. [22].....	24
Fig. 4.3 - Condensador MKV. [22].....	24
Fig. 4.4 - Aspeto de condensador impregnado a gás após destruição.....	25
Fig. 4.5 - Variação da capacidade em relação ao aumento da temperatura. ....	26
Fig. 4.6 - Ligação em estrela .....	29
Fig. 4.7 - Ligação em triângulo .....	29
Fig. 4.8 - Invólucro que contém os terminais e as resistências de descarga do condensador. [18] .....	30
Fig. 4.9 - Resistências existentes no módulo ligadas em paralelo com os terminais. [18] .....	30
Fig. 4.10 - Ação do fenómeno de <i>self-healing</i> .....	31
Fig. 4.11 - Elementos do mecanismo de segurança. [18].....	32
Fig. 4.12 - Condensador inchado.....	32
Fig. 4.13 - Condensador Frako MSCD a óleo de Média Tensão. [19].....	33
Fig. 4.14 - Configuração em estrela dupla com proteção de desequilíbrio. [21] .....	34
Fig. 4.15 - Esquema de um condensador MT equipado com fusíveis internos.....	34
Fig. 4.16 - Atenuação de um pico de tensão de 25kV efetuada por um condensador MT de 0,25µF. [18] .....	35
Fig. 4.17 - Grupos fixos. [21].....	35
Fig. 4.18 - Relógio Horário programável semanal. [25].....	37
Fig. 4.19 - Princípio de funcionamento de um TI. [26].....	38
Fig. 4.20 - Contactador com módulo de descarga. [26] .....	40
Fig. 4.21 - Bateria de condensadores convencional de 35kVAr.....	40
Fig. 4.22 - Esquema de controlo de uma bateria de condensadores convencional. [21] .....	41
Fig. 4.23 - Visualização das Tensões compostas. [28] .....	42
Fig. 4.24 - Visualização Formas de Onda da Tensão. [28] .....	42
Fig. 4.25 - Visualização do Espectro de Harmónicos. [28].....	42
Fig. 4.26- Totalizadores de Energia. [28].....	42
Fig. 4.27 - Módulo de comutação por tirístores. [28] .....	43
Fig. 4.28 - Diferenças entre a comutação por contactores e por tirístores. [28].....	43
Fig. 4.29 - Corrente medida à saída de uma bateria de condensadores de 550kVAr equipada com módulos de comutação por tiristor que exibiam picos de corrente na sua operação. ....	43
Fig. 4.30 - Fonte de corrente ideal. ....	44
Fig. 4.31 - Esquema de uma unidade com cargas produtoras de harmónicos. ....	44
Fig. 4.32 - Esquema de uma unidade com cargas produtoras de harmónicos e com uma bateria de condensadores instalada.....	45

Fig. 4.33 - Frequência de ressonância.....	45
Fig. 4.34 - Valores da impedância de acordo com o nº de grupos utilizados. [29] .....	46
Fig. 4.35 - Nova configuração do circuito após instalação do indutor em série para cada grupo de condensadores. ....	47
Fig. 4.36 - Impedância do circuito com condensadores e indutores de 7%. [29] .....	47
Fig. 4.37 - Impedância do circuito com condensadores e indutores de 5,67%. [29] .....	49
Fig. 4.38 - Indutor trifásico para filtragem de harmônicos. ....	51
Fig. 4.39 - Filtro Ativo. ....	51
Fig. 4.40 - Esquema de funcionamento de um filtro ativo. [21] .....	52
Fig. 4.41 - Espectro harmônico antes da compensação. [30] .....	53
Fig. 4.42 - Formas de onda da tensão e da corrente antes da compensação. [30] .....	53
Fig. 4.43 - Espectro harmônico após a compensação. [30].....	53
Fig. 4.44 - Formas de onda da tensão e da corrente após a compensação. [30].....	53
Fig. 4.45 - Seleção das ordens a compensar. [31] .....	54
Fig. 5.1 - Potência a compensar. [32] .....	56
Fig. 5.2 - Consumo de potência reativa de uma instalação durante 24 horas.....	57
Fig. 5.3 - Exemplo de fatura de uma unidade de corte de granito. ....	58
Fig. 5.4 - Gráficos de potência ativa, reativa e fator de potência. ....	60
Fig. 5.5 - Espectro de harmônicos. ....	60
Fig. 5.6 - Valores de tensão composta durante todo o período de medições. ....	61
Fig. 6.1 - Disposição dos motores lineares, próximo dos carris. ....	64
Fig. 6.2 - Potência aparente da carga.....	65
Fig. 6.3 - Potência reativa da carga. ....	65
Fig. 6.4 - Potência reativa resultante face à consumida e à compensada. ....	66
Fig. 6.5 - Parte do sistema de 3,6kVAr. ....	66
Fig. 6.6 – Comportamento de uma cava de tensão sem intervenção do sistema. ....	67
Fig. 6.7 - Influência do sistema no tratamento da cava de tensão. ....	68
Fig. 6.8 - Comportamento do fator de potência durante o período de produção. ....	69
Fig. 6.9 - Comportamento das potências no período de arranque.....	70
Fig. 6.10 - Potência reativa consumida por grupo de lâmpadas fluorescentes com balastro ferromagnético.....	71
Fig. 6.11 - Fator de potência de grupo de lâmpadas fluorescentes com balastro ferromagnético. ....	72
Fig. 6.12 - Potência reativa fornecida por grupo de lâmpadas fluorescentes de balastro eletrônico. ....	72
Fig. 6.13 - Fator de potência de grupo de lâmpadas fluorescentes com balastro eletrônico. ...	73
Fig. 7.1 - Degrau provocado pela retirada instantânea de toda a potência da bateria de condensadores. ....	76
Fig. 7.2 - Retirada individual de cada um dos grupos da bateria de condensadores.....	76
Fig. 7.3 - Detalhe da potência reativa no período de maior consumo.....	77
Fig. 7.4 - Fator de potência durante o período de maior consumo. ....	77
Fig. 7.5 - Potência reativa consumida no período de menor carga. ....	79
Fig. 7.6 - Fator de potência durante o período de menor consumo.....	79
Fig. 7.7 - Limitação de espaço existente no local. ....	81
Fig. 7.8 - Regulação do <i>threshold</i> de entrada dos grupos. ....	82

Fig. 7.9 - Ligações efetuadas com recurso a 2 condutores de 185mm <sup>2</sup> por fase.....	84
Fig. 7.10 - Bornes de ligação dos 3 TIs.....	85
Fig. 7.11 - Espectro de harmónicos da instalação.....	86
Fig. 7.12 - Indutor trifásico antes da impregnação em verniz.....	93
Fig. 7.13 - Perfis de fibra de vidro (Dogbone). ....	94
Fig. 7.14 - Aparelho de ensaios de rigidez dielétrica até 10kV. [33] .....	94
Fig. 7.15 - SWM-3A.....	95
Fig. 7.16 - Esquema de ligação dos módulos de comutação aos indutores e condensadores. ..	96
Fig. 7.17 - Variação do consumo instantâneo de uma extrusora. ....	97
Fig. 7.18 - Picos de consumo de potência reativa na carga. ....	97
Fig. 7.19 - Circuito de proteção a temperaturas elevadas do sistema.....	99



## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Valores instantâneos das Potências e respetivo de Fator de Potência de uma pastelaria.....	9
Tabela 2.2 - Tensões harmónicas nos pontos de entrega até à ordem 25. [7].....	12
Tabela 2.3 - Valores recomendados de corrente harmónica de acordo com a corrente de curto-circuito. [8].....	13
Tabela 3.1 - Fatores multiplicativos associados aos vários escalões [11].....	17
Tabela 3.2 - Tangente mínima faturada e período de integração dos diversos casos.....	18
Tabela 3.3 - Proporção de Energia Reativa a ser fornecida com a Energia Ativa [13].....	18
Tabela 3.4 - Proporção de Energia Reativa a ser fornecida com a Energia Ativa. [12].....	19
Tabela 3.5- Proporção de Energia Reativa a ser fornecida com a Energia Ativa [12].....	19
Tabela 3.6 - Custo da Energia Reativa em €/kVArh [13].....	19
Tabela 3.7 - Ciclo semanal opcional para fornecimentos MAT, AT e MT em Portugal continental [14].....	20
Tabela 3.8 - Ciclo semanal para todos os fornecimentos em Portugal continental [14].....	20
Tabela 3.9 - Ciclo diário para fornecimentos BTE e BTN em Portugal continental [14].....	21
Tabela 4.1 - Valores máximo de pico suportados de acordo com os fabricantes para os diferentes tipos de dielétrico.....	24
Tabela 4.2 - Valores da corrente máxima em regime contínua.....	24
Tabela 4.3 - Valor mais comum em toda a gama relativamente a perdas no dielétrico e na totalidade do circuito do condensador.....	25
Tabela 4.4 - Designação do dielétrico de acordo com vários fabricantes. [16] [20] [21].....	25
Tabela 4.5 - Categorias de temperatura dos condensadores. [16] [18].....	26
Tabela 4.6 - Duração mínima em horas de condensadores sujeitos a uma temperatura de 55°. .....	27
Tabela 4.7 - Distorção harmónica total máxima suportada para diferentes níveis de tensão nominal. [21] [23].....	28
Tabela 4.8 - Temperaturas registadas à superfície dos condensadores durante longos períodos de funcionamento.....	28
Tabela 4.9 - Valores de potência reativa a compensar de acordo com a potência e tipo de transformador. [16].....	36
Tabela 4.10 - Frequências de ressonância e ordens de interharmónicas de acordo com o fator de redução.....	50
Tabela 6.1 - Valores médios obtidos, com e sem o sistema em funcionamento.....	63
Tabela 6.2 - Valores registados em MT durante o período de produção máxima.....	69
Tabela 7.1 - Valores de potência no período de maior consumo.....	78
Tabela 7.2 - Características e custo dos sistemas de 250 kVAr e 300kVAr.....	78
Tabela 7.3 - Valores de potência no período de menor consumo.....	79
Tabela 7.4 - Características e custo dos sistemas de 275kVAr e 330kVAr.....	80
Tabela 7.5 - Correntes máximas admissíveis de forma contínua por condutor, a uma temperatura ambiente de 20°C para cabo XAV. [33].....	83
Tabela 7.6 - Lista de eventuais problemas e possíveis soluções.....	98



## **Acrónimos**

AT – Alta Tensão

BTE – Baixa Tensão Especial

BTN – Baixa Tensão Normal

EN – *European Standard*

ERSE – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos

FP – Fator de Potência

FV – Fotovoltaica

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

IP – Ingress Protection

MAT – Muito Alta Tensão

MKP - *Metallisierter Kunststoff Polypropylen*

MT – Média Tensão

NC – Normally Closed

NO – Normally Open

PP - Polipropileno

PRE – Produção em Regime Especial

PRO – Produção em Regime Ordinário

PS – Posto de Seccionamento

PT – Posto de Transformação

RND – Rede Nacional de Distribuição

RNT – Rede Nacional de Transporte

SWM – Switching Module

THD – Total Harmonic Distortion

TI – Transformador de Intensidades

TT – Transformador de Tensões



# 1. Introdução

## 1.1 - Enquadramento

O elevado consumo energético dos países desenvolvidos associado ao aumento do consumo dos países em vias de desenvolvimento tem elevado o preço da energia a cada ano que passa. Devido às preocupações ambientais relativamente às alterações climáticas foram feitos fortes incentivos na aposta em tecnologias renováveis de produção de energia. Apesar de inesgotáveis, estas fontes de energia possuem custos de produção bem mais elevados que a produção em regime ordinário. Durante alguns anos a implementação de energias renováveis em Portugal não se fez sentir em termos económicos para os consumidores. Só nos últimos anos têm ocorrido avanços no sentido de reduzir o défice tarifário, aproximando o custo para os consumidores do verdadeiro custo de produção. Este efeito combinado com o aumento dos combustíveis fósseis tem provocado um aumento no custo global da energia, independentemente da sua origem.

A circulação de potência reativa nas linhas de transporte e distribuição, reduz significativamente o rendimento da transmissão de potência. No sentido de promover maior atenção à compensação de energia reativa, foram publicadas alterações às regras de faturação em vigor dando origem a um fator de potência mais restrito com fortes penalizações para os consumidores que apresentam fatores de potência muito degradados ( $\tan \varphi > 0,5$ ) e períodos de integração mais exigentes. O agravamento dos custos com a energia reativa trouxe alguma atenção por sistemas de compensação de potência reativa.

Apesar de ser cada vez mais evidente a preocupação dos fabricantes de equipamentos elétricos com a distorção harmónica, cada vez são mais os equipamentos causadores deste problema. Sendo assim não faz sentido nos dias de hoje, instalar um sistema de compensação de energia reativa sem filtragem de harmónicos, visto que estes também são responsáveis por perdas de rendimento e por problemas no funcionamento de equipamentos.

## 1.2 - Motivação

As alterações das regras de faturação de energia reativa que entraram em vigor nos últimos anos tornaram mais rigorosas as condições de faturação. Muitas empresas viram a necessidade urgente de agir relativamente a este assunto de modo a reduzir os seus custos. No entanto observou-se muita falta de rigor em alguns casos e foram tomadas decisões erradas em termos de potência, resolução, parametrização, filtragem de harmónicos e frequências de ressonância. Em algumas instalações chegaram a ser provocados incêndios e perda total dos equipamentos de compensação. Para além disto, a legislação nem sempre é bem interpretada, levando a erros grosseiros na escolha de soluções a implementar. Outro problema é o aumento de cargas não lineares causadoras de correntes harmónicas. A instalação de baterias de condensadores sem filtragem amplifica a distorção harmónica agravando um problema que por si só era problemático.

Esta dissertação tem como objetivo reunir de forma condensada os conhecimentos fundamentais para escolher e dimensionar as soluções mais adequadas para a grande maioria dos casos em que é necessário eliminar ou pelo menos mitigar a faturação de energia reativa, seja de natureza indutiva ou capacitiva.

Pretende-se então:

- Realizar uma explicação de toda a legislação que diz respeito a este âmbito de modo a esclarecer dúvidas que possam persistir acerca das regras de faturação;
- Evidenciar a grande vantagem de utilizar analisadores de energia classe A com elevada precisão e tempo de amostragem inferior a  $20\mu\text{s}$  capazes de detetar mínimas variações e efeitos transitórios;
- Demonstrar as debilidades do cálculo da potência dos sistemas a instalar através do método académico;
- Demonstrar os problemas de funcionamento que a escolha de componentes errados e o mau dimensionamento podem trazer aos sistemas;
- Realizar um caso de estudo com uma análise rigorosa das condições da instalação para dar uma noção das limitações que nunca seriam consideradas em ambiente puramente teórico;
- Comparar elementos constituintes de um sistema de compensação, efetuar um dimensionamento adequado e justificar as escolhas de modo a otimizar a solução evitando sobredimensionamentos e custos desnecessários;
- Demonstrar que nem sempre é necessário recorrer a um sistema de correção do fator de potência quando ocorre faturação de energia reativa e que muitos problemas podem ser resolvidos com a mera reparametrização de equipamentos.

### **1.3 - Estrutura**

Esta dissertação está dividida em 8 capítulos cujo conteúdo é descrito como se segue. No capítulo 1 é realizado o enquadramento do trabalho, são descritos os objetivos e é explicada a estrutura da dissertação. No capítulo 2 são descritos conceitos teóricos fundamentais para a compreensão deste tema. No capítulo 3 referente à legislação, é mencionada a evolução das regras de faturação de energia reativa nos últimos anos assim como é feita uma descrição detalhada dos decretos-lei e portarias referentes à faturação de energia reativa. Ainda neste capítulo são feitas algumas críticas e sugestões relativamente à legislação em vigor. No capítulo 4 é feita uma descrição de todos os elementos e alternativas utilizadas em sistemas de compensação de energia reativa. Simultaneamente são feitas comparações entre elementos do mesmo tipo baseadas no comportamento destes componentes em diversos sistemas instalados em Portugal. Depois no capítulo 5 são descritas as formas de cálculo da potência dos sistemas explicando as vantagens e limitações de cada uma. No capítulo 6 são descritos casos distintos de várias aplicações deste tipo de sistemas que não diretamente a compensação de energia reativa. Assim demonstra-se a utilidade deste tipo de sistemas em diversas situações para além da correção de energia reativa. Também se demonstra neste mesmo capítulo que nem sempre é necessário instalar um sistema de compensação de energia reativa quando há faturação de energia reativa. Visto que em alguns casos nem é essa a melhor opção, pois em instalações como supermercados e hipermercados, a substituição da

iluminação por iluminação de balastro eletrônico revela-se muito superior. No capítulo 7 demonstra-se um caso de estudo onde são descritos todos os passos do dimensionamento, processo de fabrico e instalação de um sistema de compensação de energia reativa com filtragem passiva de harmónicos. São descritas todas as escolhas possíveis e feitas comparações com situações diferentes para melhor explicar as opções tomadas. No capítulo 8 são descritas as conclusões obtidas neste trabalho assim como problemas que surgiram e a respetiva solução.



## 2. Noções teóricas

Neste capítulo pretende-se apresentar noções básicas que constituem os conceitos fundamentais deste tema. Serão apresentadas todas as fórmulas essenciais ao cálculo das grandezas fundamentais para o tema da compensação do fator de potência com filtragem de harmônicos. Também será feita uma breve apresentação de problemas relacionados com a qualidade de energia e os problemas associados a estes.

### 2.1 - Potência

Existem várias noções sobre potência que embora sendo básicas, são essenciais para a compreensão de conceitos como o fator de potência e a sua respetiva correção.

Sendo a expressão da tensão instantânea:

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \theta_v) \quad (2.1)$$

E a expressão da corrente instantânea:

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \theta_i) \quad (2.2)$$

A expressão da potência instantânea  $p(t)$  fornecida à carga é dada por,

$$p(t) = v(t)i(t) = V_m I_m \cos(\omega t + \theta_v) \cos(\omega t + \theta_i) \quad (2.3)$$

Utilizando a seguinte relação trigonométrica

$$\cos A \cos B = \frac{1}{2} \cos(A - B) + \frac{1}{2} \cos(A + B) \quad (2.4)$$

Podemos reescrever a expressão da potência instantânea da seguinte forma

$$\begin{aligned} p(t) &= \frac{1}{2} V_m I_m [\cos(\theta_v - \theta_i) + \cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i)] \\ &= \frac{1}{2} V_m I_m \{\cos(\theta_v - \theta_i) + \cos[2(\omega t + \theta_v) - (\theta_v - \theta_i)]\} \\ &= \frac{1}{2} V_m I_m \{\cos(\theta_v - \theta_i) + \cos[2(\omega t + \theta_v)] \cos(\theta_v - \theta_i) + \sin[2(\omega t + \theta_v)] \sin \theta_v - \theta_i\} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Sabendo que  $V$  é o valor eficaz de  $v(t)$  em que  $V = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$ ,  $I$  é o valor eficaz de  $i(t)$  em que  $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$  e substituindo a diferença de ângulo entre tensão e corrente por  $\varphi$  em que  $\varphi = \theta_v - \theta_i$  podemos representar a equação anterior da seguinte forma,

$$p(t) = VI \cos(\varphi) + VI \cos(\varphi) \cos[2(\omega t + \theta_v)] + VI \sin(\varphi) \sin[2(\omega t + \theta_v)] \quad (2.6)$$

Dividindo a expressão da potência instantânea em duas componentes obtemos uma componente referente à parte real da potência instantânea e outra referente à parte imaginária da potência instantânea. [1]

A componente real é dada por,

$$p_{real}(t) = VI \cos(\varphi) + VI \cos(\varphi) \cos[2(\omega t + \theta_v)] \quad (2.7)$$

Como o segundo termo tem um valor médio igual a 0, o valor médio da potência consumida pela componente resistiva da carga, designa-se por potência ativa, representa-se por  $P$  é dado por,

$$P = VI \cos \varphi \quad (2.8)$$

A componente imaginária da expressão da potência instantânea é dada por,

$$p_{imaginária}(t) = VI \sin(\varphi) \sin[2(\omega t + \theta_v)] \quad (2.9)$$

Esta expressão possui um valor médio igual a zero. Sendo que a amplitude da potência que oscila entre a alimentação e a carga, designa-se por potência reativa, é representada por  $Q$  e é dada por,

$$Q = VI \sin \varphi \quad (2.10)$$

### 2.1.1 - Potência Ativa

A potência ativa é completamente consumida pela carga. Existe também uma componente desta potência que se dissipa nos cabos da instalação e linhas de transporte. A potência ativa é a única que produz trabalho, daí se representar no eixo real do diagrama das potências.

Apesar de a frequência ser o parâmetro mais estável da rede elétrica, esta pode ser ligeiramente influenciada pela potência ativa, no entanto é necessária a entrada em funcionamento ou deslastre de uma carga ou de uma central de produção de energia elétrica (ambos na ordem dos MW de potência), para existir uma influência mínima na frequência da rede elétrica.

### 2.1.2 - Potência Reativa

A potência reativa circula entre a rede de distribuição e a carga, ou entre as baterias de condensadores e a carga. A potência reativa pode ser consumida e fornecida localmente mas não se dissipa no transporte. Quando nos referimos ao consumo de potência reativa, na realidade apenas estamos a dizer que a forma de onda da corrente está atrasada em relação à forma de onda da tensão ou seja a potência reativa é de natureza indutiva. Quando dizemos que existe fornecimento de potência reativa estamos a dizer que a forma de onda da corrente está adiantada em relação à forma de onda da tensão ou seja a potência reativa é de natureza capacitiva. Como este tipo de potência circula sem ser realmente consumida, não faz qualquer tipo de trabalho e como tal representa-se no eixo imaginário do diagrama das potências.

A maioria das pessoas encara a potência reativa como um problema mas esta deve ser encarada apenas como uma variável. A potência reativa constitui um problema quando existe faturação por consumo ou fornecimento da mesma. O aumento de corrente provocado pela sua circulação nas instalações e redes de transporte e distribuição de energia provoca perdas e torna todo o sistema menos eficiente, implicando o sobredimensionamento de transformadores, proteções, cablagens, etc. No entanto não é possível haver indução sem potência reativa e vice-versa. Todos os elementos magnéticos que utilizem corrente alternada baseiam o seu funcionamento na potência reativa. A potência reativa permite até efetuar a regulação do valor da tensão resolvendo alguns problemas na indústria e no sector da construção caso nos deparemos com valores baixos de tensão. No caso dos geradores, a injeção rápida de potência reativa pode evitar a paragem do gerador perante uma cava de tensão. Na maior parte das situações de produção até é exigido o fornecimento de uma determinada percentagem de energia reativa face à energia ativa produzida.

Vista desta forma a potência reativa pode ter tanto de útil como de problemático. Tudo depende da situação que temos em mãos.

### 2.1.3 - Potência Aparente

A potência aparente representa a totalidade da potência que flui no circuito, sendo calculada como o módulo da soma do quadrado da potência ativa e reativa.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.11)$$

Na presença de uma carga puramente resistiva, não existe desfasamento entre tensão e corrente e apenas temos potência ativa o que significa que fator de potência é unitário e a potência aparente seria igual à potência ativa.

Se a carga for puramente indutiva, existe um atraso da corrente face à tensão de 90°. Se a carga for puramente capacitiva, existe um avanço da corrente face à tensão de 90°. Nestas condições o fator de potência é nulo e a potência aparente é igual à potência reativa.

- S:** Potência aparente em VA
- P:** Potência ativa em W
- Q:** Potência reativa em VAR
- φ:** Desfasamento em graus, entre a corrente I e a tensão V.

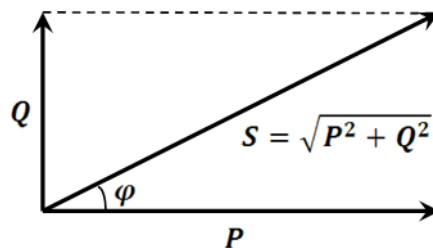


Fig. 2.1 - Triângulo das Potências. [2]

## 2.2 - Fator de Potência

Na presença de cargas lineares, ou seja assumindo que a distorção harmônica é inexistente e as nossas formas de onda são puramente sinusoidais, o fator de potência é igual ao  $\cos \varphi$ . No entanto, devido à existência da componente harmônica, o fator de potência real é menor ou igual que o  $\cos \varphi$ . [3]

$$FP = \frac{P}{S} \leq \cos \varphi \quad (2.12)$$

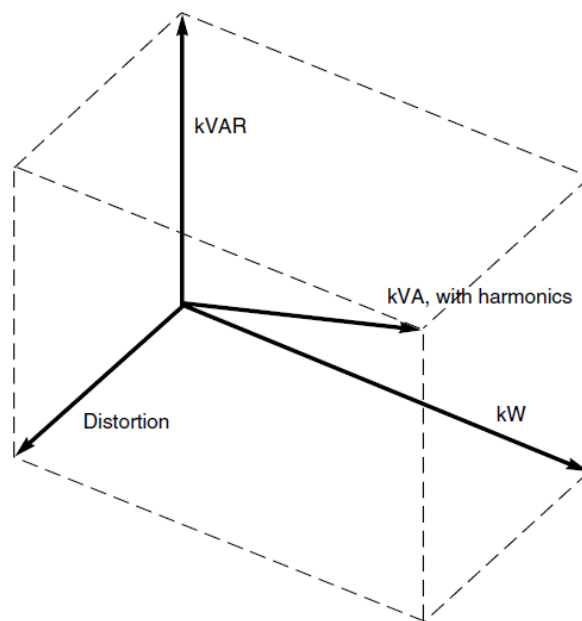


Fig. 2.2 - Acréscimo da Potência Aparente devido à existência de harmônicos. [4]

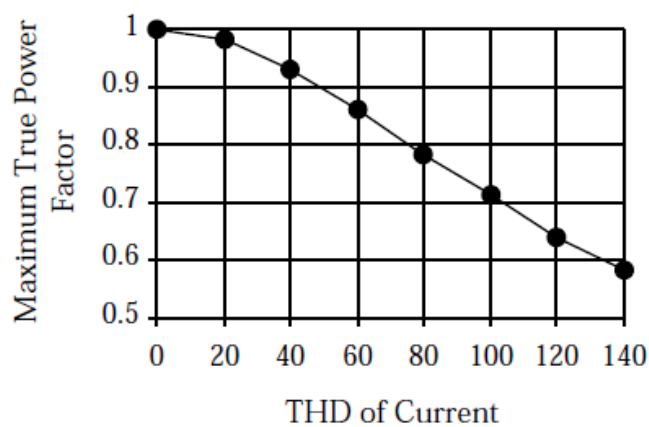


Fig. 2.3 - Degradação do Fator de Potência Real face ao aumento da Distorção Harmônica Total da Corrente. [5]

Power Summary					
	Active Power	Reactive Power	Apparent Power	True PF	Displacement PF
Phase 1	4.5922 kW	1.5310 kVAr	4.8407 kVA	0.9487 (Ind)	0.9492 (Ind)
Phase 2	6.9766 kW	1.1533 kVAr	7.0713 kVA	0.9866 (Ind)	0.9876 (Ind)
Phase 3	2.4132 kW	3.4489 kVAr	4.2093 kVA	0.5733 (Ind)	0.5720 (Ind)
Neutral	0.0000 kW	0.0000 kVAr	0.0000 kVA	***	---
Total	13.982 kW	6.1333 kVAr	16.121 kVA	0.8673 (Ind)	0.9492 (Ind)

Tabela 2.1 - Valores instantâneos das Potências e respetivo de Fator de Potência de uma pastelaria.

Como se pode verificar neste exemplo, estão representados dois tipos de valor de fator de potência, o “Displacement Power Factor” e o “True Power Factor”. O “Displacement Power Factor” corresponde ao fator de potência unicamente calculado através da componente fundamental das formas de onda da tensão e da corrente. O “True Power Factor”, para além da componente fundamental, leva em consideração toda a componente harmónica no seu cálculo. [5]

$$THD = \sqrt{\left(\frac{Y_2 + Y_3 + Y_4 + \dots + Y_\infty}{Y_1}\right)^2} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{Y_h}{Y_1}\right)^2} \quad (2.13)$$

$$True\ Power\ Factor = Displacement\ Power\ Factor \times \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (2.14)$$

É necessário ter em atenção se utilizamos um aparelho de medida (multímetro, analisador, etc) que faz medições *rms* (harmónicos incluídos) ou se apenas mede a componente fundamental. No exemplo da Tabela 2.1, foi utilizado um analisador de energia que apresenta o valor eficaz (*rms*) das potências. Neste caso podemos verificar que o quociente entre a potência ativa e a potência aparente tem como resultado o valor fator de potência real (*True Power Factor*).

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{13,982}{16,121} = 0,8673 = True\ PF \quad (2.15)$$

Se as medições forem efetuadas com um aparelho que consiga medir valores *rms*, podemos considerar o resultado do quociente entre a potência ativa e a potência aparente como o valor do “True Power Factor”. Utilizando este equipamento, como sabemos que estamos a utilizar valores eficazes das potências, é possível calcular o fator de potência real sem recorrer ao cálculo da distorção harmónica total (*THD*).

Quando é necessário obter do fator de potência de um equipamento ou instalação é recomendável aferir a natureza dos valores que o nosso equipamento de medição fornece. Pois se apenas for capaz de medir valores fundamentais, corremos o risco de cometer erros grosseiros no dimensionamento de uma solução para correção do fator de potência.

## 2.3 - Qualidade da Energia

Não é possível falar de compensação de energia reativa sem fazer referência aos problemas recorrentes da sua ausência ou da sua aplicação associada a determinadas tecnologias.

### 2.3.1 - Cavas de Tensão

As cavas de tensão ocorrem com alguma regularidade e podem causar vários problemas. As cavas de tensão podem ter como origem curto-circuitos na rede, manobras de produção e transferências de carga, arranques de motores de potência apreciável, etc. [5]

Como consequências podemos ter:

- Paragem de motores, implicando perdas de produção tanto temporais como materiais;
- Perdas de produção industrial por perdas de parametrização e falha de comunicação dos circuitos de controlo;
- Paragem de geradores, originando energia que deixou de ser produzida e os respetivos custos de arranque;
- Perdas de informação em sistemas informáticos.

No caso dos equipamentos informáticos obviamente, a melhor solução será uma UPS. No caso dos geradores, um sistema de compensação de energia reativa em tempo real (tempo de reação <20ms) com um *firmware* adequado para o controlo da tensão em vez do fator de potência, pode mitigar significativamente as cavas de tensão. A própria compensação convencional em si eleva ligeiramente a tensão, o que pode ser suficiente para que a cava de tensão não tenha efeitos tão nocivos.

### 2.3.2 - Sobretensões e Subtensões

As sobretensões são variações de tensão acima dos 110% do valor nominal durante mais de 1 minuto. [3]

As sobretensões podem ter como origem descargas atmosféricas, quedas de árvores, deslocamento do ponto de neutro, manobras de rede, manobras de baterias de condensadores, má regulação dos *taps* do transformador, simultaneidade de cargas capacitivas, etc. Sobretensões prolongadas podem danificar elementos de iluminação e enrolamentos de motores.

Subtensões são variações de tensão abaixo dos 90% do valor nominal durante mais de 1 minuto.

As subtensões podem ter como origem sobrecargas na rede, deslastre de linhas importantes no fornecimento de energia, lentidão de sistemas de reposição do valor da tensão, operação de baterias de condensadores, simultaneidade de cargas indutivas, etc. As subtensões podem ter consequências semelhantes às cavas de tensão em adição à subida do valor da corrente e aumento das perdas por aquecimento de condutores durante toda a sua duração.

### 2.3.3 - Transitórios

Os efeitos transitórios observados na rede e nas instalações de consumidores, podem surgir devido a qualquer manobra na rede, arranque de equipamentos ou operação baterias de condensadores que utilizem contactores e podem ser amplificadas por condensadores criando picos de corrente significativos que podem levar à destruição de equipamentos eletrónicos.

### 2.3.4 - Flutuações de Tensão (*Flicker*)

As flutuações de tensão são oscilações contínuas e aleatórias do valor de tensão. Estas oscilações situam-se abaixo dos 5% do valor eficaz da tensão. As flutuações de tensão podem ser provocadas por equipamentos de soldar, iluminação fluorescente, fornos a arco, etc. Nas situações em que a causa das flutuações de tensão são máquinas de soldar e fornos a arco, é possível revolver a situação com a introdução de um sistema de compensação de energia reativa em tempo real (<20ms) de forma a corrigir imediatamente os picos de consumo de potência reativa, impedindo que estes afetem o valor da tensão.

### 2.3.4 - Desequilíbrios de tensão

Existe desequilíbrio de tensão sempre que as 3 fases apresentarem amplitudes diferentes ou possuírem um desfasamento entre si diferente de 120°.

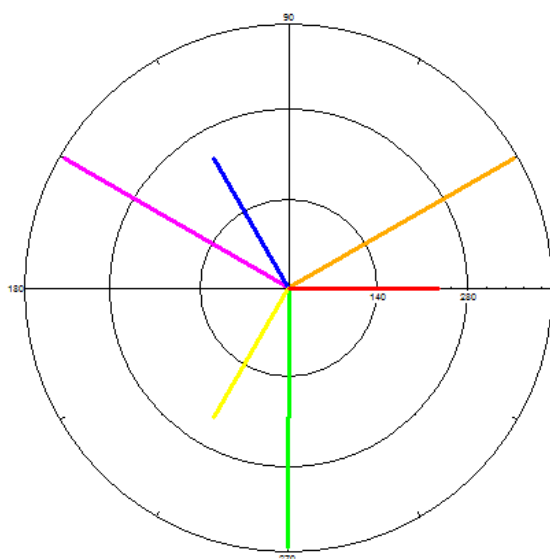


Fig. 2.4 - Representação fasorial das tensões simples e compostas.

$V_1$ Vermelho	$V_{12}$ Laranja
$V_2$ Amarelo	$V_{23}$ Verde
$V_3$ Azul	$V_{31}$ Rosa

Desequilíbrios de tensão provocam sobreaquecimento de motores e transformadores, surgimento de tensão no neutro, mau funcionamento de sistemas de compensação simétricos, resultando em compensação incorreta em uma ou duas fases. Um sintoma que denuncia o desequilíbrio de fases é a existência de harmónicos de 3ª ordem.

### 2.3.5 - Harmónicos

Os harmónicos são criados por cargas não lineares, que não absorvem correntes com a mesma forma de onda da tensão. Os principais elementos responsáveis pela geração de harmónicos são retificadores, variadores, máquinas de soldar, extrusoras, fontes de alimentação, iluminação fluorescente, equipamentos informáticos, etc.

Os harmónicos são responsáveis por diversos problemas, uns mais graves que outros. Entre eles estão:

**Perdas por aquecimento e efeito pelicular:** A corrente adicional do conteúdo harmónico adiciona-se à componente fundamental, traduzindo-se numa corrente rms de valor superior, provocando um aquecimento superior dos condutores. Os harmónicos possuem valores de frequência várias vezes superior à fundamental. À medida que a frequência aumenta, as cargas afastam-se da alma do condutor e aproximam-se da extremidade. Desta forma as cargas não utilizam a totalidade da secção, o que tem um efeito prático de redução de secção e consequente aquecimento dos condutores.

**Distorção da forma de onda da tensão:** A distorção harmónica desequilibra fases, altera a forma de onda podendo descontrolar, degradar e até destruir equipamentos eletrónicos.

**Perdas no transformador:** Tal como nos condutores, a distorção harmónica tem efeitos negativos no cobre e no ferro do transformador. O acréscimo de corrente e a frequência mais elevada aumentam a temperatura e as perdas nos enrolamentos de cobre pelas mesmas razões que nos condutores. A distorção harmónica agrava a vibração das placas de ferro do transformador provocando mais ruído e aquecimento.

**Poluição da rede:** Os harmónicos não constituem problema apenas para a instalação que os produz. Em casos mais severos, a distorção harmónica é enviada para a rede, tendo efeitos nocivos nas instalações vizinhas.

#### 2.3.5.1 - Distorção harmónica da tensão

Cria campos girantes inversos, principalmente devido aos harmónicos de 5ª ordem, provocando perdas substanciais de potência no ferro de equipamentos indutivos, provocando oscilações mecânicas nos veios dos motores e deve ser reduzida ao mínimo. A norma EN50160 recomenda uma THDv máxima de 8% e uma distorção para cada harmónico de acordo com a seguinte tabela:

Harmónicos ímpares				Harmónicos pares	
Não múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Ordem h	Tensão relativa	Ordem h	Tensão relativa	Ordem h	Tensão relativa
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6...24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

Tabela 2.2 - Tensões harmónicas nos pontos de entrega até à ordem 25. [7]

A distorção harmónica da tensão deve ter especial atenção, pois todo o conteúdo harmónico da tensão terá influência direta na forma de onda da corrente.

### 2.3.5.2 - Distorção harmónica da corrente

Causa perdas de potência por aquecimento dos cabos (efeito pelicular), perdas por histerese, perdas de rendimento em motores e máquinas. Nas baterias, os condensadores poderão chegar a perfurar e rebentar, por formarem circuitos ressonantes com a instalação, à frequência das componentes harmónicas. Como tal, a THDi deve ser reduzida ao mínimo. A norma Std 519-1992, do IEEE, recomenda os seguintes valores, de acordo com a corrente de curto-circuito e de carga da rede:

$I_{sc} / I_L$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THD
<20	4,0 %	2,0 %	1,5 %	0,6 %	0,3 %	5,0 %
20<50	7,0 %	3,5 %	2,5 %	1,0 %	0,5 %	8,0 %
50<100	10,0 %	4,5 %	4,0 %	1,5 %	0,7 %	12,0 %
100<1000	12,0 %	5,5 %	5,0 %	2,0 %	1,0 %	15,0 %
>1000	15,0 %	7,0 %	6,0 %	2,5 %	1,5 %	20,0 %

Tabela 2.3 - Valores recomendados de corrente harmónica de acordo com a corrente de curto-circuito. [8]

Para dar uma noção mais concreta da magnitude que a distorção harmónica pode atingir, observemos os seguintes gráficos:

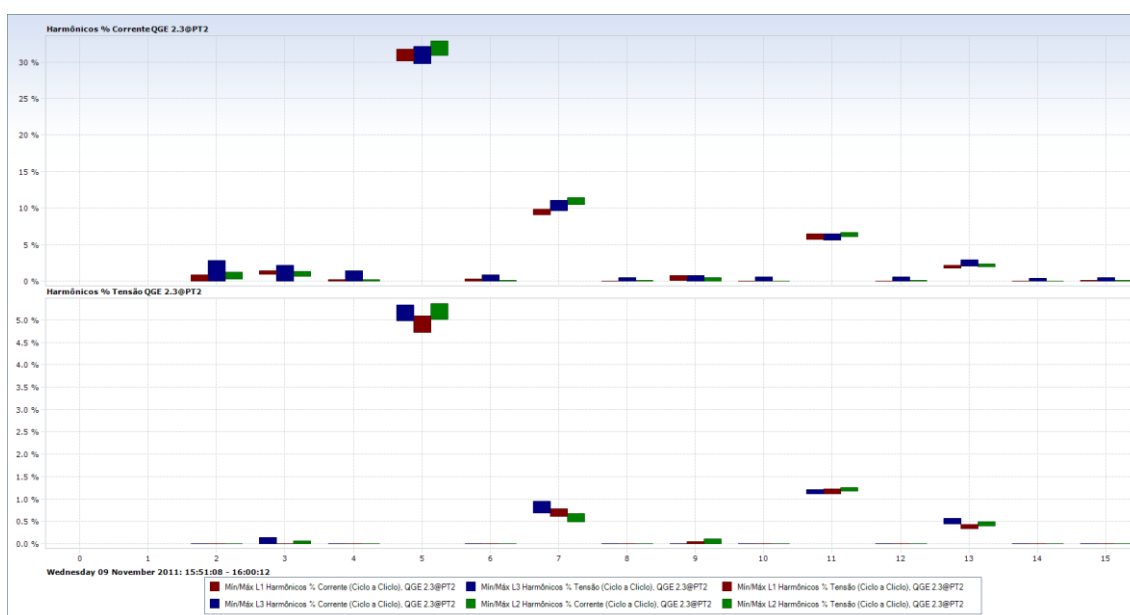
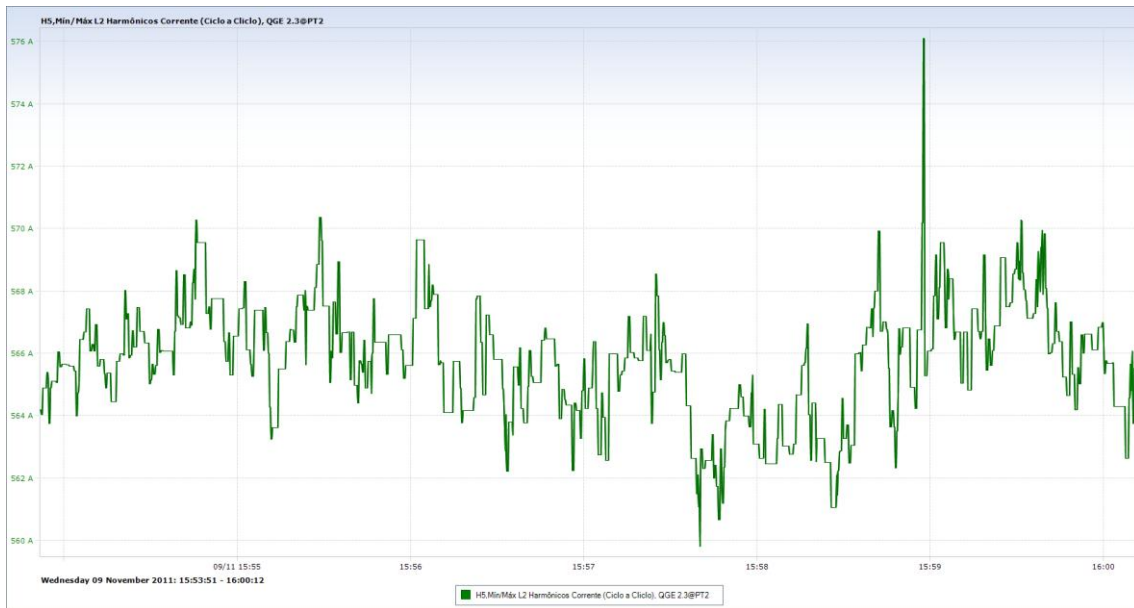


Fig. 2.5 - Espectro harmónico em percentagem, até à ordem 15.

Temos o espectro harmónico até à 15ª ordem, medido num quadro geral que alimentava 2 motores de potência considerável. Estes motores utilizavam 2 variadores e a compensação de energia reativa era feita por uma bateria convencional sem filtragem de harmónicos. O valor de THD obtido era ligeiramente superior a 30%, o que é bastante normal sempre que temos a presença de variadores cujo conteúdo harmónico é amplificado pela bateria de condensadores. Como podemos observar, o harmónico predominante é o de 5ª ordem com 30% do valor da fundamental, seguindo-se o 7º harmónico ligeiramente superior a 10% e o 11º harmónico que é aproximadamente de 7%.



**Fig. 2.6 - Gráfico com os valores da corrente do 5º harmônico.**

Com uma componente fundamental da corrente próxima de 2000A e o harmónico de 5ª ordem de longe como predominante, a amplitude do 5º harmónico de corrente é superior a 560A como podemos verificar na figura anterior. Sabendo que o harmónico de 5ª ordem é responsável pela criação de campos girantes inversos podemos concluir que estes 560A estão a contribuir para um efeito de frenagem dos motores e não devemos esquecer que esta corrente que apenas representa uma ordem de harmónicos que provoca perdas por aquecimento dos cabos.

### 3. Legislação

Neste capítulo é feita uma descrição de toda a legislação em vigor referente às condições de faturação de energia reativa indutiva e capacitiva em Portugal. Será feita uma comparação com a legislação anteriormente em vigor para melhor compreensão dos equipamentos e das fórmulas de cálculo utilizadas até então, visto que eram toleráveis maiores erros de dimensionamento.

#### 3.1 - Consumidores

As regras atuais que definem as condições de faturação da Energia Reativa são as que constam do Despacho nº 7253/2010. Este documento é uma evolução do Despacho nº 18413-A/2001.

##### 3.1.1 - Despacho nº 18413-A/2001

Segundo o Despacho nº 18413-A/2001 [9], a energia Reativa era faturada mediante as seguintes condições:

- A Energia Reativa é faturada a clientes que tenham o seu fornecimento de Energia em MAT, AT, MT e BTE. Os clientes BT ficam de fora deste tipo de faturação;
- Só era faturada a Energia Reativa que excedesse uma tangente de  $\varphi=0,4$ ;
- A Energia Reativa fornecida à rede pode ser faturada;
- O período de integração da Energia Reativa é mensal, tanto para a Energia Reativa consumida como para a fornecida.

##### 3.1.2 - Proposta de Alteração das Regras de Faturação de Energia Reactiva – Novembro 2009

A partir de Abril de 2005, relativamente ao processo de revisão do Regulamento das Relações Comerciais, a ERSE promoveu a participação de consumidores e operadores de forma a aprofundar o estudo e análise das condições de faturação da Energia Reativa. A intenção deste estudo era aumentar a eficiência do sistema elétrico, estimulando os consumidores a terem maior empenho na compensação local de Energia Reativa e também atualizar a regulamentação face à evolução tecnológica das soluções de compensação de Energia Reativa.

Em Novembro de 2009, foi apresentada uma proposta, com novos limites da  $tg(\varphi)$ , introdução de escalões que diferenciavam a faturação de Energia Reativa conforme o Fator de Potência e novos períodos de integração da energia consumida e fornecida.

Foi proposta a redução do valor da  $tg(\varphi)$  a partir da qual se iniciava a faturação de Energia Reativa para 0,3 face aos 0,4 anteriores. Desta forma havia uma harmonização com o sistema já implementado em Espanha com escalões de faturação progressivos a partir de uma  $tg(\varphi) = 0,33$ .

A proposta mencionava a manutenção da faturação da Energia Reativa Indutiva no período de horas fora do vazio para os clientes MAT, AT, MT e BTE, assim como a introdução dos seguintes escalões de faturação:

- 3º Escalão:  $0,5 < tg(\varphi)$ ;
- 2º Escalão:  $0,4 < tg(\varphi) \leq 0,5$ ;
- 1º Escalão:  $0,3 < tg(\varphi) \leq 0,4$ ;

Cada um destes escalões seria depois associado a um fator multiplicativo definido pela ERSE. [10]

### 3.1.3 - Contradições

A maior parte dos equipamentos de contagem existentes no mercado possuem como intervalo de integração um período mínimo de 15 minutos. Este poderia ser perfeitamente o tempo de integração escolhido para Faturação de Energia Reativa ou então um ligeiramente superior. Já existiam sistemas de compensação de energia reativa capazes de reagir a variações de carga em menos de 20ms há mais de 10 anos e muitos sistemas económicos reagem numa questão de segundos. No entanto, o documento elaborado em Novembro de 2009 refere que “segundo as empresas, por motivos de natureza quer técnica quer económica, este intervalo de tempo de 15 minutos, revela-se porém demasiado curto face às atuais boas práticas de atuação nos controlos dos equipamentos de compensação de energia reativa (capacitiva), nomeadamente baterias de condensadores, sendo desejável um intervalo de tempo mais alargado.”

A justificação das empresas apenas contraria a motivação das alterações das regras de faturação da energia reativa, que se baseava na melhoria da eficiência do sistema elétrico e no aumento da motivação dos consumidores na compensação de energia reativa. Para melhorar a eficiência do sistema elétrico devia ser proposta uma solução para otimizar a compensação de energia reativa dentro dos limites do bom senso. Um sistema de compensação de energia reativa económico que recorra a contactores para efetuar a comutação dos grupos de condensadores consegue reagir em menos de 5 segundos sendo a sua reação tanto mais lenta quanto maior for a instabilidade da carga.

Desde que seja feito o dimensionamento correto (principalmente em termos de resolução) do sistema de compensação e o seu sistema de controlo seja parametrizado corretamente, um período de integração de 15 ou 30 minutos não seria crítico, embora fosse perfeitamente compreensível que algumas opiniões preferissem um período de integração de 1 hora por exemplo.

Caso estejamos perante situações em que ocorrem várias operações dos contactores devido às variações de carga, isto acelera o desgaste dos mesmos, encurtando o seu tempo de vida útil. Então nestas situações o sistema a utilizar deve recorrer a comutação por tirístores e não por contactores. O problema não é do tempo de integração mas sim da implementação da tecnologia errada face às necessidades reais.

Tipicamente um período de integração mais rigoroso distingue melhor quem realizou um dimensionamento e uma parametrização correta do equipamento de compensação daquele que efetuou um dimensionamento e uma parametrização grosseira. A diferença entre um sistema mais complexo e dispendioso dum mais económico não é tão notória face a um período de integração mais curto.

A utilização de períodos de integração superiores a uma hora acaba por apenas ocultar escolhas erradas em termos de resolução e parametrização. Na maior parte das situações, a diferença de investimento, caso fosse tomada a decisão certa, é mínima comparada com os custos decorrentes dessa má decisão.

Outra recomendação do documento publicado pela ERSE em Novembro de 2009 referia que os consumidores deveriam ser incentivados a desligarem as baterias de condensadores assim que terminassem os seus processos industriais. Esta situação apenas se justifica, se não houver acompanhamento do funcionamento da bateria de condensadores após a instalação. Uma bateria de condensadores bem dimensionada e parametrizada muito dificilmente fornecerá potência reativa capacitiva que resulte num fator de potência inferior a 0,98 capacitivo durante períodos superiores a 5 segundos. Podem ser necessários alguns ajustes após a instalação pelo que o acompanhamento das primeiras faturas é fulcral.

### 3.1.4 - Despacho nº 7253/2010 e Despacho nº 12605/2010

Os Despachos nº 7253/2010 e nº 12605 definem as regras aplicadas após o período de estudo. [9] [10]

Escalões, períodos de integração e respetivas datas de entrada em vigor das novas regras:

- Entrada em vigor do escalão  $0,5 < tg(\varphi)$ ; em 1 de Janeiro de 2011.
- Entrada em vigor do período de integração diário para entregas do operador da rede de transporte ao operador de rede de distribuição em Portugal Continental, em Janeiro de 2011.
- Entrada em vigor do escalão  $0,3 < tg(\varphi) \leq 0,4$  e período de integração diário para clientes em MAT, AT e MT em Portugal Continental, em Janeiro de 2012.

Tal como estava previsto anteriormente, as quantidades de energia reativa a faturar serão associadas a fatores multiplicativos de forma a incentivar os consumidores com pior fator de potência a efetuar (ou rever) a compensação de potência reativa.

Escalão	Descrição	Fator Multiplicativo
1	$0,3 < tg(\varphi) \leq 0,4$	0,33
2	$0,4 < tg(\varphi) \leq 0,5$	1
3	$0,5 < tg(\varphi)$	3

Tabela 3.1 - Fatores multiplicativos associados aos vários escalões [11]

É possível ser induzido em erro que os clientes que tenham o seu fornecimento de energia em BTE não estejam sujeitos ao pagamento do 1º escalão de energia reativa ( $0,3 < tg(\varphi) \leq 0,4$ ), visto que não existe referência a BTE neste ponto, porque o período de integração para instalações BTE é igual ao período de faturação, ou seja, mensal. Este facto pode ser confirmado na última alínea do ponto 5 do artigo 4.

“Os pontos de entrega do operador de rede de distribuição em MT aos operadores de rede de distribuição em BT não são objeto de faturação de energia reativa.

Os períodos de integração das entregas de energia reativa para aplicação das regras de faturação são os seguintes:

- Diário, para os pontos de entrega do operador da rede de transporte ao operador da rede de distribuição, em Portugal Continental.
- Diário para os pontos de entrega a clientes em MAT, AT e MT em Portugal Continental.
- Igual ao período de faturação, para os pontos de entrega a clientes em AT e MT nas Regiões Autónomas dos Açores e da Madeira.
- Igual ao período de faturação, para os pontos de entrega a clientes em BTE em Portugal Continental e nas Regiões Autónomas.” [10]

Como podemos verificar nos Despachos nº 7253 e nº 12605 de 2010 todas as alterações de escalões e períodos de integração apenas dizem respeito à energia reativa indutiva. Desta forma a faturação de energia reativa capacitiva mantém os mesmos moldes da legislação anterior. Ou seja a energia reativa capacitiva é faturada sempre que a energia reativa fornecida à rede durante as horas de vazio resulte numa  $tg(\varphi)$  inferior a 0,4 perante um período de integração mensal [10]. Para facilitar a leitura destas novas regras dadas as diferenças entre energia reativa indutiva e capacitiva, níveis de tensão do fornecimento de energia, continente e regiões autónomas, é preferível visualizar as diferenças numa tabela.

Valores da $tg(\varphi)$ a partir do qual é faturada energia reativa e período de integração aplicado			
Níveis de Tensão	Natureza da Energia Reativa		
	Indutiva		Capacitiva
	Continente	Regiões Autónomas	
<b>MAT</b>	$tg(\varphi)0,3$ /diário	$tg(\varphi)0,3$ /mensal	$tg(\varphi)0,4$ /mensal
<b>AT</b>	$tg(\varphi)0,3$ /diário	$tg(\varphi)0,3$ /mensal	$tg(\varphi)0,4$ /mensal
<b>MT</b>	$tg(\varphi)0,3$ /diário	$tg(\varphi)0,3$ /mensal	$tg(\varphi)0,4$ /mensal
<b>BTE</b>	$tg(\varphi)0,3$ /mensal	$tg(\varphi)0,3$ /mensal	$tg(\varphi)0,4$ /mensal

Tabela 3.2 - Tangente mínima faturada e período de integração dos diversos casos

## 3.2 - Produtores

### 3.2.1 - RNT

Não existe referência a Produtores em Regime Ordinário na Portaria nº596/2010, daí a sua ausência neste ponto.

Os produtores em regime especial ligados à rede nacional de transporte devem acompanhar a produção de energia ativa com a proporção em energia reativa de acordo com a seguinte tabela:

Tensão Nominal no Ponto de Ligação	$tg(\varphi)$	
	Horas CP	Horas VS
<b>MAT</b>	0,2	0
<b>AT</b>	0,2	0

Tabela 3.3 - Proporção de Energia Reativa a ser fornecida com a Energia Ativa [13]

Está prevista uma tolerância de 5% de desvio destes valores.

## 3.2.2 - RND

### 3.2.2.1 - Produtores em Regime Ordinário

Tensão Nominal no Ponto de Ligação	$tg(\varphi)$	
	Horas CP	Horas VS
MT	0,4	0

Tabela 3.4 - Proporção de Energia Reativa a ser fornecida com a Energia Ativa. [12]

A energia reativa em falta durante as Horas CP e fornecida durante as horas VS é paga ao Operador da rede de distribuição.

### 3.2.2.2 - Produtores em Regime Especial

De acordo com a Portaria nº596/2010, os produtores em regime especial devem, nas horas CP (Horas Cheias e Horas de Ponta), fazer acompanhar o fornecimento de energia ativa de uma quantidade de energia reativa, 2946 Diário da República, 1.ª série — N.º 147 — 30 de Julho de 2010 apurada em intervalos de sessenta minutos, de acordo com a seguinte tabela:

Tensão Nominal no Ponto de Ligação	$tg(\varphi)$	
	Horas CP	Horas VS
AT	0,0	0
MT(P>6MW)	0,0	0
MT(P≤6MW)	0,3	0
BT	0	0

Tabela 3.5- Proporção de Energia Reativa a ser fornecida com a Energia Ativa [12]

Está prevista uma tolerância de 5% de desvio destes valores.

## 3.3 - Tarifários

Como o nosso âmbito principal em termos energéticos é a energia reativa, apenas se apresentam a seguir os custos por kVArh consumido e fornecido e os períodos horários a que estes se aplicam.

Níveis de Tensão	Indutiva	Capacitiva
MAT	0,0211	0,0158
AT	0,0215	0,0161
MT	0,0234	0,0176
BTE	0,0268	0,0204

Tabela 3.6 - Custo da Energia Reativa em €/kVArh [13]

Ciclo semanal opcional para MAT, AT e MT em Portugal Continental			
Período de hora legal de Inverno		Período de hora legal de Verão	
De segunda-feira a sexta-feira		De segunda-feira a sexta-feira	
Ponta:	17.00/22.00 h	Ponta:	14.00/17.00 h
Cheias:	00.00/00.30 h 07.30/17.00 h 22.00/24.00 h	Cheias:	00.00/00.30 h 07.30/14.00 h 17.00/24.00 h
Vazio normal:	00.30/02.00 h 06.00/07.30 h	Vazio normal:	00.30/02.00 h 06.00/07.30 h
Super vazio:	02.00/06.00 h	Super vazio:	02.00/06.00 h
Sábado		Sábado	
Cheias:	10.30/12.30 h 17.30/22.30 h	Cheias:	10.00/13.30 h 19.30/23.00 h
Vazio normal:	00.00/03.00 h 07.00/10.30 h 12.30/17.30 h 22.30/24.00 h	Vazio normal:	00.00/03.30 h 07.30/10.00 h 13.30/19.30 h 23.00/24.00 h
Super vazio:	03.00/07.00 h	Super vazio:	03.30/07.30 h
Domingo		Domingo	
Vazio normal:	00.00/04.00 h 08.00/24.00 h	Vazio normal:	00.00/04.00 h 08.00/24.00 h
Super vazio:	04.00/08.00 h	Super vazio:	04.00/08.00 h

Tabela 3.7 - Ciclo semanal opcional para fornecimentos MAT, AT e MT em Portugal continental [14]

Ciclo semanal para todos os fornecimentos em Portugal Continental			
Período de hora legal de Inverno		Período de hora legal de Verão	
De segunda-feira a sexta-feira		De segunda-feira a sexta-feira	
Ponta:	09.30/12.00 h 18.30/21.00 h	Ponta:	09.15/12.15 h
Cheias:	07.00/09.30 h 12.00/18.30 h 21.00/24.00 h	Cheias:	07.00/09.15 h 12.15/24.00 h
Vazio normal:	00.00/02.00 h 06.00/07.00 h	Vazio normal:	00.00/02.00 h 06.00/07.00 h
Super vazio:	02.00/06.00 h	Super vazio:	02.00/06.00 h
Sábado		Sábado	
Cheias:	09.30/13.00 h 18.30/22.00 h	Cheias:	09.00/14.00 h 20.00/22.00 h
Vazio normal:	00.00/02.00 h 06.00/09.30 h 13.00/18.30 h 22.00/24.00 h	Vazio normal:	00.00/02.00 h 06.00/09.00 h 14.00/20.00 h 22.00/24.00 h
Super vazio:	02.00/06.00 h	Super vazio:	02.00/06.00 h
Domingo		Domingo	
Vazio normal:	00.00/02.00 h 06.00/24.00 h	Vazio normal:	00.00/02.00 h 06.00/24.00 h
Super vazio:	02.00/06.00 h	Super vazio:	02.00/06.00 h

Tabela 3.8 - Ciclo semanal para todos os fornecimentos em Portugal continental [14]

<b>Ciclo diário para BTE e BTN em Portugal Continental</b>			
<b>Período de hora legal de Inverno</b>		<b>Período de hora legal de Verão</b>	
Ponta:	09.00/10.30 h 18.00/20.30 h	Ponta:	10.30/13.00 h 19.30/21.00 h
Cheias:	08.00/09.00 h 10.30/18.00 h 20.30/22.00 h	Cheias:	08.00/10.30 h 13.00/19.30 h 21.00/22.00 h
Vazio normal:	06.00/08.00 h 22.00/02.00 h	Vazio normal:	06.00/08.00 h 22.00/02.00 h
Super vazio:	02.00/06.00 h	Super vazio:	02.00/06.00 h

Tabela 3.9 - Ciclo diário para fornecimentos BTE e BTN em Portugal continental [14]



## 4. Tecnologias existentes

Neste capítulo são descritos todos os elementos utilizados na construção de um sistema de compensação de energia reativa com filtragem passiva de harmônicos. Também são apresentadas soluções alternativas e é feita uma análise crítica ao funcionamento de alguns componentes com base em trabalhos efetuados no âmbito da empresa onde exerci funções.

### 4.1 - Condensadores

Os condensadores são o componente mais elementar e fundamental de um sistema de compensação de energia reativa. A sua evolução permitiu reduzir o peso e as dimensões dos mesmos, melhorar a eficiência reduzindo perdas e utilizar materiais mais ecológicos. Existem vários tipos de condensadores adequados à correção do fator de potência. Estes devem ser capazes de suportar tensões entre os 230V e os 1000V para efetuarem compensação em baixa tensão. No caso dos condensadores de média tensão apresentam intervalos de tensão diferentes de fabricante para fabricante mas tipicamente vão até 36kV. [15] [16] [18] [18] [19] [20]

#### 4.1.1 - Condensadores de Baixa Tensão



Fig. 4.1 - Condensador Electronicon seco de baixa tensão. [18]

##### 4.1.1.1 - Tipos de dielétrico

Numa primeira abordagem poderemos ser levados a crer que existem diversos tipos de materiais constituintes do dielétrico adequados à compensação de energia reativa. Um olhar mais atento revela que todos utilizam Polipropileno (PP) e que a diferença de nomenclatura se deve a diferenças no tipo de impregnação e ao número de camadas metalizadas no elétrodo.

Os condensadores MKP possuem elétrodos de papel metalizados de um só lado. Podem ser impregnados a gás, resina ou óleo. Os condensadores MKK são semelhantes aos MKP mas são mais compactos, visto que possuem menos ligações internas no entanto estas características, tornaram o seu processo fabril mais complexo. Os condensadores MKV possuem elétrodos de papel metalizados dos dois lados e são impregnados exclusivamente a óleo. [16]

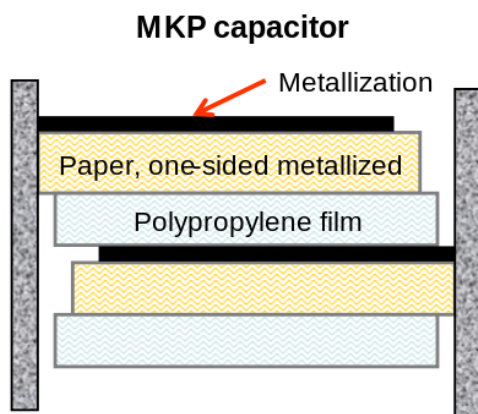


Fig. 4.2 - Condensador MKP. [22]

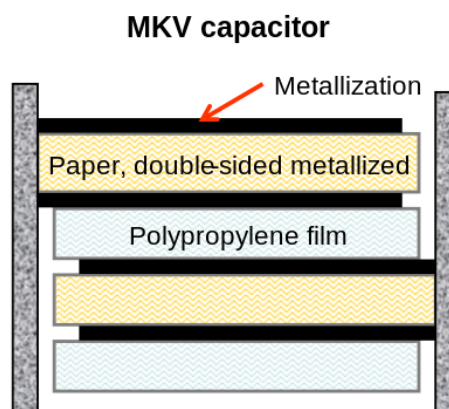


Fig. 4.3 - Condensador MKV. [22]

Os condensadores com dielétrico do tipo MKV são aqueles que possuem maior resistência a picos de corrente, suportando até 500 vezes o valor da corrente nominal. Estes picos de corrente são originados sempre que os condensadores são ligados quando existem condensadores carregados em paralelo no circuito. Este efeito deve ser mitigado com a utilização de reatâncias para valores não superiores a 100 vezes a sua corrente nominal. Existem diferenças entre a corrente máxima de pico tolerada pelos condensadores relativamente ao tipo de dielétrico utilizado. [21]

Fabricante	Ducati	Vishay	EPCOS		Franke Energy
Dielétrico	MKP	MKP	MKK	MKP	MKV
Inrush Current	200In	300In	300/400In	200In	500In

Tabela 4.1 - Valores máximo de pico suportados de acordo com os fabricantes para os diferentes tipos de dielétrico.

Os condensadores estão preparados para operar de forma contínua com valores de corrente superiores à sua corrente nominal. Estas diferenças podem dever-se a harmónicos, sobretensões e ao valor da tolerância da capacidade do condensador. O fabricante que apresenta os condensadores mais resistentes a este fenómeno é a Ducati. [21]

Fabricante	Ducati	Vishay	EPCOS	Electronicon	Franke Energy	EDE
Imáx	4,00In	1,5In	1,5In	1,25In	1,3In	1,3In

Tabela 4.2 - Valores da corrente máxima em regime contínua.

A Ducati utiliza uma designação bastante diferente (PPM) porque argumenta que os seus condensadores apresentam uma performance superior às dos outros fabricantes. No entanto não se observam grandes diferenças com exceção da redução ligeira de perdas no dielétrico que é inferior a 0,2W/kVAr praticamente em toda a gama. Podemos verificar na seguinte tabela que em termos de perdas no dielétrico os fabricantes de condensadores admitem valores semelhantes entre si. [16] [18] [17] [20] [21] [23]

Fabricante	Ducati	Vishay	EPCOS	Electronicon	Franke Energy	EDE
Dielétrico	0,2W/KVAr	0,25W/KVAr	0,2W/KVAr	0,2W/KVAr	0,25W/KVAr	-
Total	-	0,45W/KVAr	0,45W/KVAr	0,4W/KVAr	-	0,5W/KVAr

Tabela 4.3 - Valor mais comum em toda a gama relativamente a perdas no dielétrico e na totalidade do circuito do condensador.

#### 4.1.1.2 - Impregnação

Inicialmente todos os condensadores utilizados na compensação de energia reativa eram impregnados a óleo. Esta solução permitia a aplicação em tensões mais elevadas e a distribuição homogénea da temperatura pelo condensador e maior durabilidade perante temperaturas ambientes elevadas. A evolução tecnológica tornou as tensões mais elevadas acessíveis a condensadores impregnados a gás e a resina, apesar destes ainda hoje não suportarem temperaturas ambiente tão elevadas como os condensadores impregnados a óleo. A utilização de gases inertes como o nitrogénio e de resina biodegradável é bem mais interessante do ponto de vista ambiental. Perante a destruição de um ou vários condensadores, o impacto em termos de sujidade dos condensadores com agente impregnante seco (Fig. 4.4) é significativamente menor que o impacto da destruição de vários condensadores impregnados a óleo. [21]



Fig. 4.4 - Aspeto de condensador impregnado a gás após destruição.

Na seguinte tabela temos o exemplo de 3 fabricantes e a designação utilizada para os diferentes tipos de impregnação.

Impregnação	Ducati	Vishay	Epcos
Gás (Nitrogénio)	-	PhMKPg	MKK
Resina	PPM (MKP)	-	MKK/MKP
Óleo	PPMh	PhMKP	MKV

Tabela 4.4 - Designação do dielétrico de acordo com vários fabricantes. [16] [20] [21]

Os condensadores impregnados a gás e a óleo, podem ser instalados em qualquer posição. No caso dos condensadores impregnados a resina, apenas se deve instalar os mesmos numa posição vertical visto que o seu agente impregnante é um misto de resina e gás. Se os condensadores não forem colocados na vertical, a resina acaba por escorrer e distribuir-se de forma irregular. [18]

#### 4.1.1.3 - Temperatura

A temperatura ambiente tem um forte impacto na durabilidade dos condensadores. As temperaturas elevadas para além de reduzirem drasticamente o tempo de vida útil dos condensadores, acabam por os tornar frágeis a picos de corrente e distorção harmónica elevada. A norma IEC 60831 veio definir categorias de temperatura relativamente a valores máximos instantâneos e valores médios diários e anuais. [18]

Categoria	Valor Máximo	Valor médio de temperatura	
		1 Dia	1 Ano
A	40°C	30°C	20°C
B	45°C	35°C	25°C
C	50°C	40°C	30°C
D	55°C	45°C	35°C
60	60°C	50°C	40°C
70	70°C	55°C	45°C

Tabela 4.5 - Categorias de temperatura dos condensadores. [16] [18]

A norma IEC 60831 apenas contempla as categorias de A até D mas como atualmente diversos fabricantes ultrapassam estes requisitos é adequado inserir outras categorias que se considerem relevantes.

O aumento de temperatura provoca variações da capacidade dos condensadores. Os condensadores de dielétrico de polipropileno revelam uma diminuição de capacidade face ao aumento da temperatura. A figura seguinte evidencia a diminuição da capacidade dos condensadores MKP em percentagem em relação ao aumento de temperatura em graus Celsius.

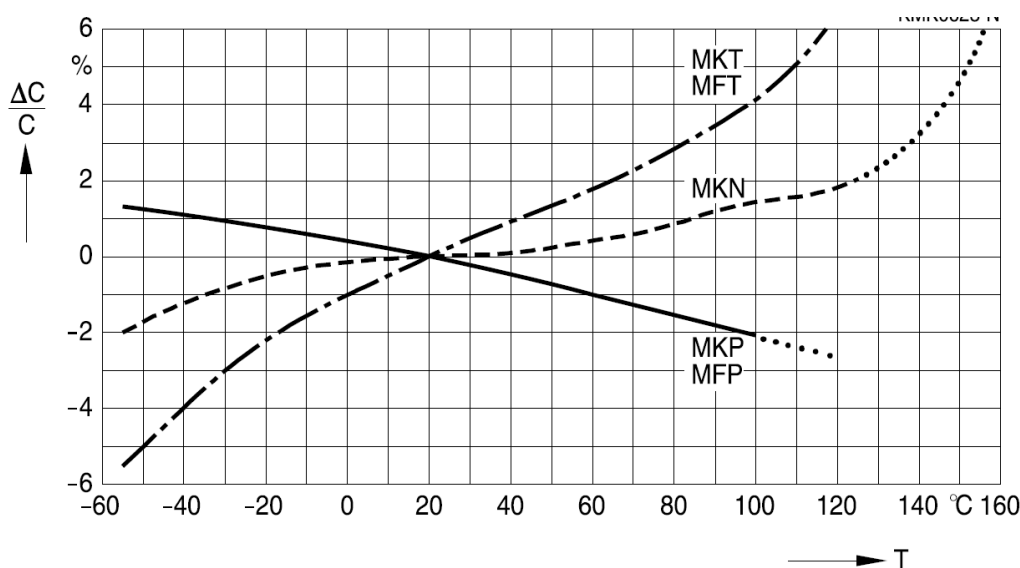


Fig. 4.5 - Variação da capacidade em relação ao aumento da temperatura.

#### 4.1.1.4 - Vida útil e respetiva relação com a THDi e a tensão nominal

Quanto mais elevada for a categoria de um condensador maior se torna a durabilidade dos mesmos. No entanto não depende apenas deste fator visto que diferentes fabricantes podem apresentar tempos de vida útil diferentes para categorias iguais.

Fabricante	Epcos		Ducati		Vishay	
Dielétrico	MKP	MKV	MKP	PPmh	MKP	MKP
Impregnação	Resina	Óleo	Resina	Óleo	Gás	Óleo
Vida útil em horas a 55°C	≥100.000	≥300.000	≥110.000	≥110.000	≥130.000	≥150.000

Tabela 4.6 - Duração mínima em horas de condensadores sujeitos a uma temperatura de 55°.

Como podemos verificar não existe uma relação direta (apesar de existir uma tendência que os condensadores a óleo sejam mais resistentes) entre o tipo de impregnação e o tempo de vida útil dos condensadores. No caso da Ducati a diferença até é nula.

Para além da temperatura, os parâmetros que mais podem ter influência na durabilidade de um condensador são: as condições externas de distorção harmónica e a capacidade intrínseca do condensador em resistir a essa distorção. Quanto maior for a tensão nominal do condensador este torna-se mais resistente à distorção harmónica da corrente. Existem vários níveis de tensão nominal embora na esmagadora maioria dos casos os condensadores apenas são aplicados em locais alimentados a 400V e a 690V. Diferentes níveis de tensão nominal permitem ao utilizador fazer uma escolha adequada ao nível de distorção harmónica existente e até em relação ao nível de tensão existente no local. Obviamente não é correto colocar cegamente condensadores de 400V e até mesmo de 415V tendo em conta que não são raras as vezes que encontramos valores de tensão eficaz superiores a esses. Infelizmente é algo comum a existência de condensadores de tensões nominais iguais ou inferiores a 415V em sistemas trifásicos. Esta escolha tem consequências como a destruição prematura de alguns condensadores e perda de capacidade. Fatores como distorção harmónica, temperatura, sobretensões e picos de corrente deterioram as propriedades do condensador causando uma perda de capacidade progressiva neste. À medida que os condensadores perdem capacidade é necessário proceder à sua substituição em caso de perda de capacidade elevada ou então acrescentar um condensador de menor potência de modo a que o grupo mantenha uma potência próxima da original. Esta operação não tem como único propósito manter a potência reativa do grupo de modo a efetuar a compensação de forma correta. Em situações onde temos uma reatância para filtragem de harmónicos em série com o grupo de condensadores acabamos por ter um desvio da frequência de ressonância. Caso este desvio leve a frequência de ressonância para a frequência de um dos harmónicos predominantes podem ocorrer diversos problemas. Inevitavelmente a distorção harmónica aumenta exponencialmente. Perante estas condições, diversos condensadores podem ser destruídos, equipamentos eletrónicos na instalação podem avariar devido aos elevados picos de corrente, causados pelo efeito de ressonância de harmónicos predominantes.

Fabricante	415V	450V	525V
Ducati	12%	20%	27%
EDE	12%	12%	27%

Tabela 4.7 - Distorção harmónica total máxima suportada para diferentes níveis de tensão nominal. [21] [23]

Os restantes fabricantes não disponibilizam estes valores. É no entanto visível que os condensadores da EDE de tensão nominal igual 450V possuem uma tolerância à distorção harmónica da corrente muito menor que os da Ducati. Esta limitação foi claramente visível nas instalações por mim efetuadas e intervencionadas, visto que os condensadores da EDE destruíam-se muito mais rapidamente que os restantes condensadores de outros fabricantes sujeitos exatamente às mesmas condições.

Durante as operações de manutenção realizadas, foi detetada uma diferença assinalável da temperatura de funcionamento dos condensadores da EDE face aos de outros fabricantes. Verificou-se uma diferença de cerca de 10° C acima dos padrões normais, o que poderá justificar esta degradação acelerada. Apesar de indicarem perdas semelhantes a todos os outros fabricantes, isto acaba por não se verificar em funcionamento tendo em conta o maior aquecimento dos condensadores.

Fabricante	Ducati	EDE	Epcos
Temperatura	31°C	41°C	30°C

Tabela 4.8 - Temperaturas registadas à superfície dos condensadores durante longos períodos de funcionamento.

#### 4.1.1.5 - Ligações externas ou internas

De modo a reduzir perdas e evitar correntes de neutro por desequilíbrio de fases, os condensadores de BT, são ligados em triângulo. Como já tínhamos visto podem ser monofásicos ou trifásicos. Quando os condensadores são monofásicos, é necessário proceder à ligação externa para que estes fiquem ligados em triângulo. Os condensadores trifásicos já possuem essa configuração de fábrica. [17]

A configuração em triângulo permite o mesmo nível de potência reativa para condensadores de menor capacidade, visto que a tensão aplicada aos condensadores é superior face à configuração em estrela, como podemos verificar: [16]

$$Q_c = V_c \cdot I_c \quad (4.1)$$

$$Q_c = V_c \cdot \frac{V_c}{X_c} = \frac{(V_c)^2}{X_c} \quad (4.2)$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (4.3)$$

Substituindo 4.3 em 4.2 obtemos:

$$Q_c = (V_c)^2 \cdot 2\pi f C \quad (4.4)$$

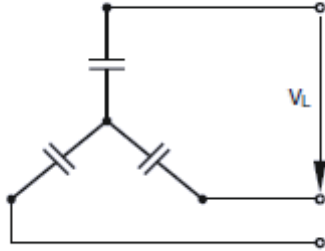


Fig. 4.6 - Ligação em estrela

$$Q = 3 \cdot Q_c \quad (4.5)$$

$$V_c = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad (4.6)$$

Combinando 4.4, 4.5 e 4.6:

$$Q = 3 \cdot \left(\frac{V_L}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot 2\pi f C_{Estrela}$$

$$C_{Estrela} = \frac{Q}{(V_L)^2 \cdot 2\pi f} \quad (4.7)$$

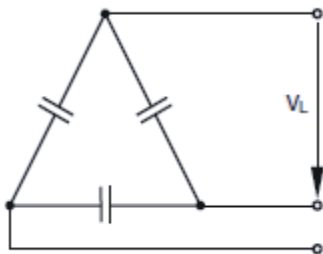


Fig. 4.7 - Ligação em triângulo

$$V_c = V_L \quad (4.8)$$

Combinando 4.4, 4.5 e 4.8,

$$Q = 3 \cdot (V_L)^2 \cdot 2\pi f C_{Triângulo} \quad (4.9)$$

$$C_{Triângulo} = \frac{Q}{3 \cdot (V_L)^2 \cdot 2\pi f} \quad (4.10)$$

Relacionando 4.7 e 4.10 obtemos:

$$C_{Estrela} = 3 \cdot C_{Triângulo} \quad (4.11)$$

Conclui-se que como a tensão aplicada nos terminais do condensador é superior na configuração em triângulo, obtemos maior potência reativa. Sendo assim podemos obter o mesmo valor de potência reativa numa configuração em triângulo utilizando condensadores de menor capacidade.

#### 4.1.1.6 - Resistências de descarga

A utilização de resistências ligadas aos terminais dos condensadores permite, a descarga destes de modo a permitir o seu manuseamento após alguns minutos depois de desligados. A norma IEC 60831 define que os condensadores devem descarregar até aos 75V num período máximo de 3 minutos. Hoje em dia os fabricantes já garantem descargas até aos 50V em menos de 1 minuto. Deve ser levado em atenção que durante a descarga, as resistências podem atingir os 200°C. Sem estas resistências, os condensadores permaneceriam carregados durante longos períodos de tempo em algumas situações como por exemplo pausas de processos industriais, etc. Isso iria provocar a polarização do dielétrico, o que faz com que o condensador possua sempre uma tensão residual que mesmo após uma descarga total, pode atingir os 2% do valor da tensão que o carregava. [21] [18]

O valor das resistências a utilizar para os tempos de descarga e tensões máximas admissíveis, deve ser obtido da seguinte forma:

##### Condensadores monofásicos

$$R = \frac{1,5t}{C_t I_n \frac{V_n \sqrt{2}}{V_a}} \quad (4.12)$$

**t** - Tempo de descarga  
**C<sub>t</sub>** - Capacidade total do condensador  
**C<sub>p</sub>** - Capacidade parcial (apenas uma fase)

##### Condensadores trifásicos

$$R = \frac{t}{C_p I_n \frac{V_n \sqrt{2}}{V_a}} \quad (4.13)$$

**V<sub>n</sub>** - Tensão de alimentação  
**V<sub>a</sub>** - Tensão admissível após o tempo de descarga  
**R** - Resistência do módulo

Os condensadores não devem ser reconectados se tiverem mais de 10% da sua carga total. A parametrização dos sistemas de controlo que ligam e desligam os condensadores devem ter em conta o tempo necessário para que os condensadores descarreguem a sua carga através das resistências para que estes não sejam ligados com mais de 10% da sua carga. Se os condensadores foram ligados ainda acima dos 10% de carga, estaremos a degradar o condensador com picos de corrente para além de introduzir perturbações na instalação elétrica existente.



Fig. 4.8 - Invólucro que contém os terminais e as resistências de descarga do condensador. [18]



Fig. 4.9 - Resistências existentes no módulo ligadas em paralelo com os terminais. [18]

#### 4.1.1.7 - Self healing

Sobrecargas mais severas podem originar falhas do dielétrico devido a heterogeneidades ou poros existentes neste. Desde que os limites máximos instantâneos de tensão e corrente sejam respeitados, o surgimento de uma falha no dielétrico não constitui um problema para condensadores com estas propriedades. O processo inicia-se quando ocorre um arco elétrico entre os dois elétrodos quando o dielétrico entre eles se rompe. Esse arco elétrico atinge temperaturas próximas dos 5700°C que desintegram as moléculas de polipropileno separando os eletrões e criando iões. Este plasma criado explode na zona da falha afastando (Fig. 4.10) as superfícies de papel metalizado. As superfícies metalizadas dispostas perpendicularmente à falha no dielétrico são eliminadas pelo arco elétrico e pela explosão do plasma em expansão, criando uma zona de isolamento. A rápida expansão do plasma para a zona mais arrefecida e onde o campo elétrico não é tão forte permite a extinção da descarga elétrica em microssegundos. Este fenómeno não tem qualquer efeito relevante no funcionamento do condensador durante a falha no dielétrico, desde que este funcione dentro dos limites previstos de tensão e corrente. [16]

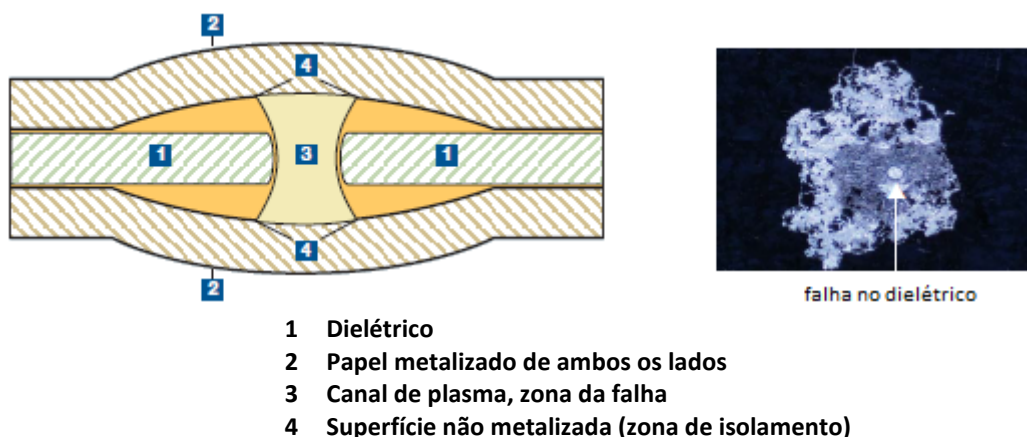


Fig. 4.10 - Ação do fenómeno de *self-healing*.

#### 4.1.1.8 - Proteção

Sobretensões, temperaturas elevadas, períodos elevados de funcionamento e diversas ocorrências de *self-healing*, provocam o aumento de pressão dentro do condensador. Este aumento de pressão pode fazer o condensador explodir e até provocar danos em elementos próximos. Uma forma de minimizar este efeito comum a todos os condensadores utilizados para compensação de energia reativa é a utilização de um mecanismo de interrupção de alimentação. Este mecanismo possui várias ligações dentro do condensador. O aumento de pressão, provoca a dilatação do topo do condensador (Fig. 4.12). À medida que a pressão aumenta, a dobra cravada no topo do condensador acaba por expandir e a tampa do topo do condensador acaba por inchar também. Esta expansão, vai quebrar as várias ligações dentro do condensador (Fig. 4.11), funcionando como fusíveis. A destruição destas ligações interrompe o circuito e o fluxo de corrente dentro do condensador, colocando este fora de serviço antes de explodir. Como é óbvio, este mecanismo apenas funciona dentro dos limites máximos admissíveis de corrente, se a corrente for superior a esses limites, o condensador acaba por explodir e em algumas situações pode arder, como é visível na Fig. 4.4. [18]

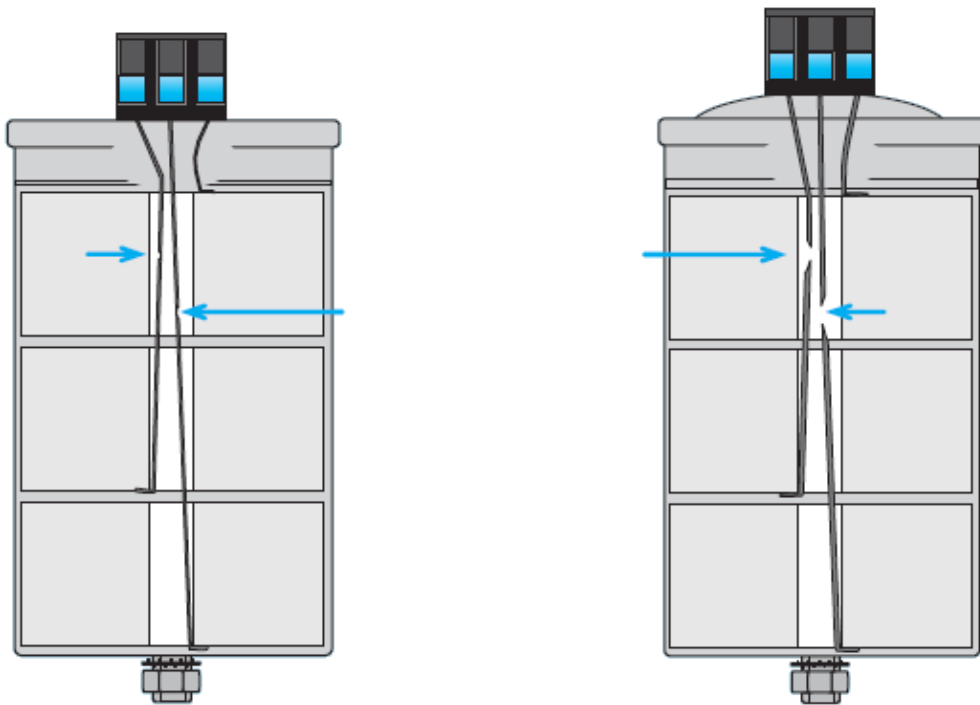


Fig. 4.11 - Elementos do mecanismo de segurança. [18]



Fig. 4.12 - Condensador inchado.

#### 4.1.1.9 - Considerações

Apesar de existirem bastantes parâmetros que tornam os condensadores mais resistentes a diversos fatores externos, os fabricantes acabam por ser muito equivalentes entre si, não se destacando nenhum em especial (exceção feita ao caso da EDE pela negativa). Na prática o parâmetro mais importante é a tensão nominal dos condensadores pois esta torna os condensadores mais resistentes à distorção harmónica. O tipo de impregnação, apesar de ser muito publicitado que os condensadores impregnados a óleo possuem maior resistência a temperaturas elevadas, acaba por não ser muito relevante. Só se verificam temperaturas ambiente acima dos 35° durante longos períodos se houver negligência por parte do utilizador da instalação. É do conhecimento geral que locais com equipamentos elétricos e eletrónicos mais sensíveis devem estar climatizados ou pelo menos ventilados. Se não existir ventilação em locais onde se verificam elevadas temperaturas os condensadores podem mesmo ser destruídos de forma muito prematura, sejam estes impregnados a gás/resina ou óleo. Para além disto os condensadores impregnados a óleo são ligeiramente mais caros e são mais problemáticos de substituir devido à sujidade que provocam quando destruídos. Sendo assim, a melhor opção em termos de condensadores serão os secos impregnados a gás (nitrogénio) ou gás/resina de forma mista. Deve também ser levado em conta que para sistemas alimentados a 400V só devem ser instalados condensadores de tensão nominal superior a 440V no mínimo e para sistemas alimentados a 690V, a tensão nominal deve ser superior a 800V.

#### 4.1.2 - Condensadores de Média Tensão

Os condensadores de média tensão podem utilizar dielétricos do tipo MKP e MKV e ser impregnados a óleo, gás ou resina, assim como também possuem propriedades de *Self-Healing* como os condensadores de BT. Podem ser aplicados em subestações de grandes consumidores ou subestações da RND. Na RND, a sua principal função é manter e controlar o valor da tensão nos barramentos.

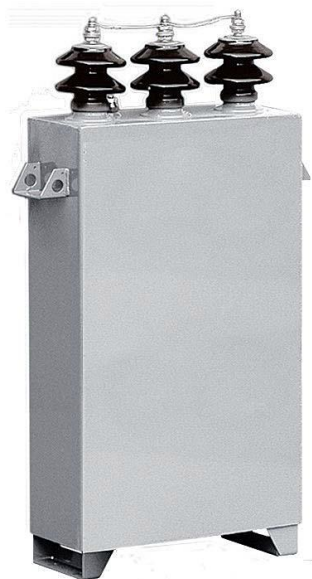


Fig. 4.13 - Condensador Frako MSCD a óleo de Média Tensão. [19]

Os condensadores MT encontram-se disponíveis em modelos monofásicos e trifásicos. Tipicamente os condensadores MT trifásicos encontram-se ligados internamente em estrela dupla. Esta configuração permite que quando um dos condensadores internos se danifica, o ponto comum às 3 fases sofre um desvio e assim que seja detetada corrente na linha de terra, é acionado um relé que abre o interruptor do grupo de condensadores. [21]

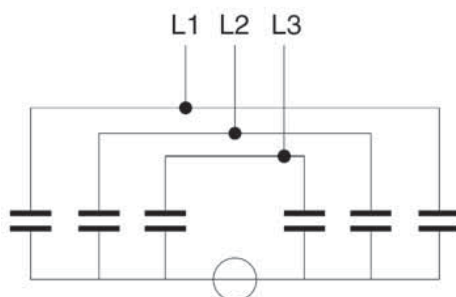


Fig. 4.14 - Configuração em estrela dupla com proteção de desequilíbrio. [21]

Outro método de proteção dos condensadores de MT é a possibilidade de utilização de fusíveis externos e a utilização de fusíveis internos. No caso dos fusíveis internos, se algum condensador interno for destruído, o fusível dedicado ao condensador destruído elimina essa parte do circuito permitindo (apesar de uma ligeira perda de capacidade), que o resto do condensador MT funcione. No entanto, caso alguns destes fusíveis sejam destruídos, deve ser feita a sua substituição, visto que existe uma elevação de tensão nos terminais dos restantes condensadores que se pode tornar problemática caso vários fusíveis sejam destruídos. [24]

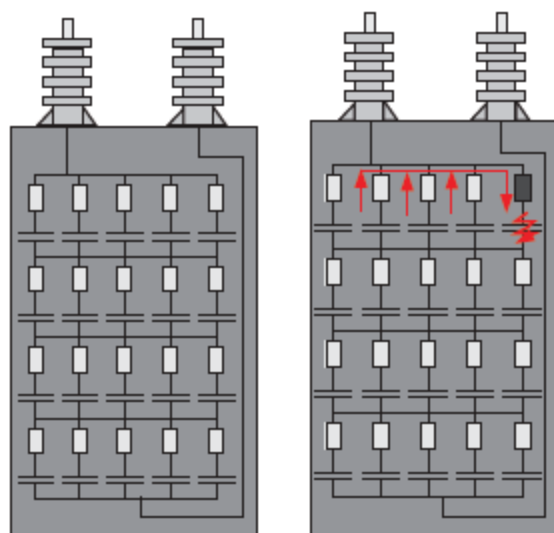


Fig. 4.15 - Esquema de um condensador MT equipado com fusíveis internos.

Quando aplicados em subestações de consumidores, para além de efetuarem a compensação de energia reativa, são capazes de filtrar picos de tensão (Fig. 4.16). Os picos de tensão podem ser provocados por manobras na RND ou por descargas atmosféricas. Os condensadores de MT podem atenuar os picos de tensão para cerca de 10% do seu valor máximo. [18]

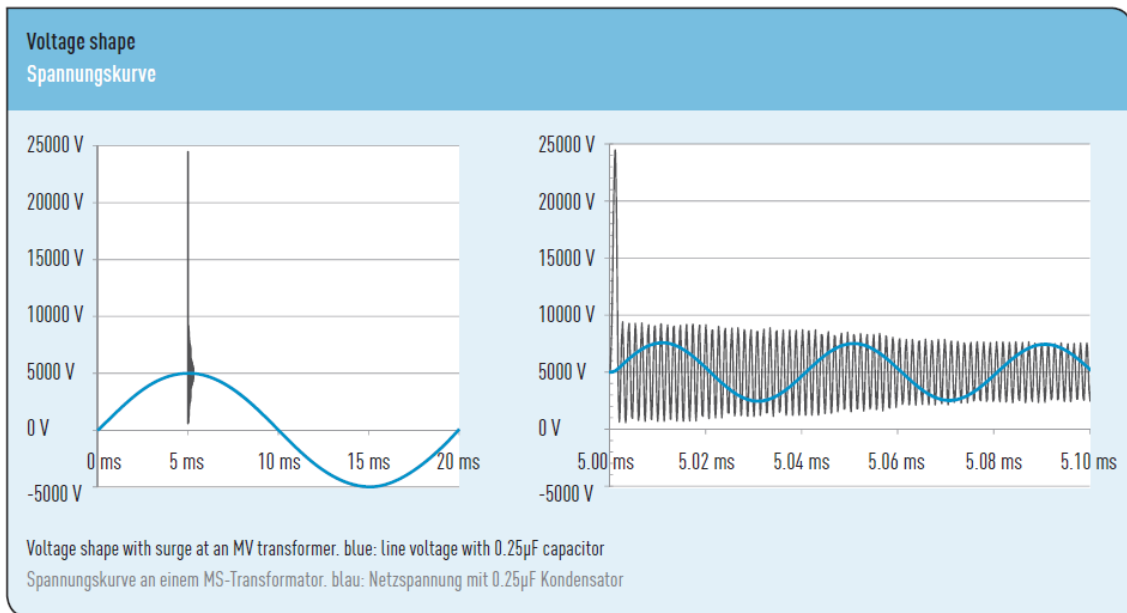


Fig. 4.16 - Atenuação de um pico de tensão de 25kV efetuada por um condensador MT de 0,25µF. [18]

## 4.2 - Métodos de implementação

### 4.2.1 - Grupos fixos

A utilização de grupos fixos é o tipo de compensação de potência reativa mais simples que existe, limitando-se a compensar uma porção da potência reativa consumida até à sua potência máxima. Não se recomenda a sua utilização para compensar a potência reativa de uma instalação completa. A sua implementação correta é mais direcionada para transformadores e motores que funcionem a regimes muito estáveis, desde que o grupo fixo apenas esteja ligado, quando o motor se encontra em funcionamento.



Fig. 4.17 - Grupos fixos. [21]

Existem tabelas com valores indicativos acerca da potência reativa consumida pelos transformadores. Como é um valor praticamente constante, não existe grande risco de errar o valor a compensar, mesmo perante variações de carga.

Potência do transformador [kVA]	Potência reativa consumida por transformadores imersos em óleo [kVAr]	Potência reativa consumida por transformadores moldados a resina [kVAr]
10	1,0	1,5
20	2,0	1,7
50	4,0	2,0
75	5,0	2,5
100	5,0	2,5
160	7,0	4,0
200	7,5	5,0
250	8,0	7,5
315	10,0	8,0
400	12,5	8,5
500	15,0	10,0
630	17,5	12,5
800	20,0	15,0
1000	25,0	16,7
1250	30,0	20,0
1600	35,0	22,0
2000	40,0	25,0
2500	50,0	35,0
3150	60,0	50,0

**Tabela 4.9 - Valores de potência reativa a compensar de acordo com a potência e tipo de transformador. [16]**

No caso dos motores, as variações de carga são muito mais significativas em termos de potência reativa. Tendo em conta a proliferação de variadores e o alto conteúdo harmónico que estes acrescentam, existe uma probabilidade de serem cometidos erros grosseiros ao tentar a compensação do consumo de potência reativa de um motor com base em grupos fixos e tabelas predefinidas. Se for colocado um grupo de potência superior à consumida pelo motor, o motor pode sofrer de um fenómeno de auto excitação e pode provocar sobretensões nos terminais do mesmo, danificando os seus enrolamentos. Quando pretendemos efetuar isoladamente a correção do fator de potência de um ou vários motores, é sempre preferível efetuar medições com um analisador de energia para não existirem surpresas ao implementar um grupo fixo com a potência errada.

## **4.2.2 - Tipos de controlo**

### **4.2.2.1 - Relógio horário**

O controlo por relógio horário (Fig. 4.18) é o mais simples e rudimentar de todos. É completamente cego a variações de carga utilizando como única referência o tempo. É de longe o método de implementação mais simples e económica. Os relógios horários mais comuns podem ser diários ou semanais. Existem algumas unidades que permitem programação anual com cerca de 50 programas diferentes mas não são tão económicos nem possuem uma interface tão acessível como os restantes. Para estas situações, as unidades semanais com mudança de hora de Inverno/Verão são a melhor opção, pois permitem uma abordagem do tipo “programar e largar”. O relógio horário possui um contacto NC que por sua vez está ligado em série com a bobine de um contactor. Deve ser tomada em atenção, a compatibilidade do nível de tensão do contacto do relógio horário e da bobine do contactor. Sendo comuns valores entre 230V e 250V para monofásicos e 380V e 400V para trifásicos.



Fig. 4.18 - Relógio Horário programável semanal. [25]

Este tipo de controlo apresenta algumas limitações e problemas associados:

- Perante uma situação de compensação central, como não existe capacidade de regulação, estaremos sempre em situação de subcompensação ou sobrecompensação. Como a energia reativa fornecida não é faturada durante as horas fora de Vazio do ponto de vista económico é preferível que o grupo tenha uma potência igual ou superior (exceto picos) a toda a curva de potência reativa consumida;
- Como apenas temos um contactor, estamos limitados em termos de potência máxima. Dificilmente um contactor poderá alimentar um grupo de condensadores acima de 150kVAr sem um forte desgaste prematuro.
- Algumas instalações utilizam este método para ter as baterias de condensadores a funcionar dentro dos horários de produção. Nesta situação, o relógio horário alimenta o relé varimétrico que controla a bateria de condensadores. No entanto caso o relógio horário desligue baterias de condensadores com vários grupos ligados, o pico de corrente gerado pode destruir vários fusíveis do circuito de comando.
- Devido a diferenças horárias nos tarifários MT, um relógio horário semanal não será capaz de acompanhar estas alterações para além da mudança de hora de Verão/Inverno. Sendo assim esta solução apenas é sensata em instalações BTE, visto que nestas instalações não existem diferenças nos períodos de horas de vazio e fora de vazio entre Inverno e Verão.

Esta opção apenas se revela interessante para algumas instalações BTE com consumo de potência reativa muito baixa, que não justifiquem por razões de custo e de potência máxima, a instalação de uma bateria de condensadores convencional (Relé varimétrico e contactores). A opção de intercalar um relógio horário com o circuito de controlo de uma bateria de condensadores não é uma opção aconselhável sabendo que a retirada instantânea de serviço de uma bateria com vários grupos ligados tem uma elevada probabilidade de destruir vários fusíveis do circuito de comando.

#### 4.2.2.2 - Relé varimétrico e contactores

Este é o tipo de solução mais vulgar para compensação de energia reativa. Permite a ligação de vários grupos de potências diferentes, onde cada grupo é um múltiplo da potência do menor grupo. A potência do menor grupo designa-se por resolução, pois este será o “step” utilizado no escalonamento da potência utilizada. Quanto menor for esta resolução, mais linear será o acompanhamento da potência debitada pela bateria de condensadores face aos requisitos da carga em termos de potência reativa de modo a acompanhar o fator de potência definido.

O princípio de funcionamento deste tipo de controlo baseia-se num elemento de controlo chamado relé varimétrico que de acordo com as necessidades de compensação, coloca e retira grupos de condensadores.

Os valores de tensão são obtidos diretamente pelo controlador. Em algumas situações são utilizados TTs mas tipicamente, esta solução só é encontrada em locais onde os valores de tensão são obtidos em MT. Os valores de corrente são obtidos através de TIs. Os TIs são constituídos por um núcleo e um enrolamento no qual é induzido um fluxo magnético pela corrente que circula nos condutores que atravessam o TI (Fig. 4.19). Esse fluxo magnético irá por sua vez induzir no enrolamento secundário, uma corrente proporcional à corrente que circula no condutor primário de acordo com a razão de transformação do TI.

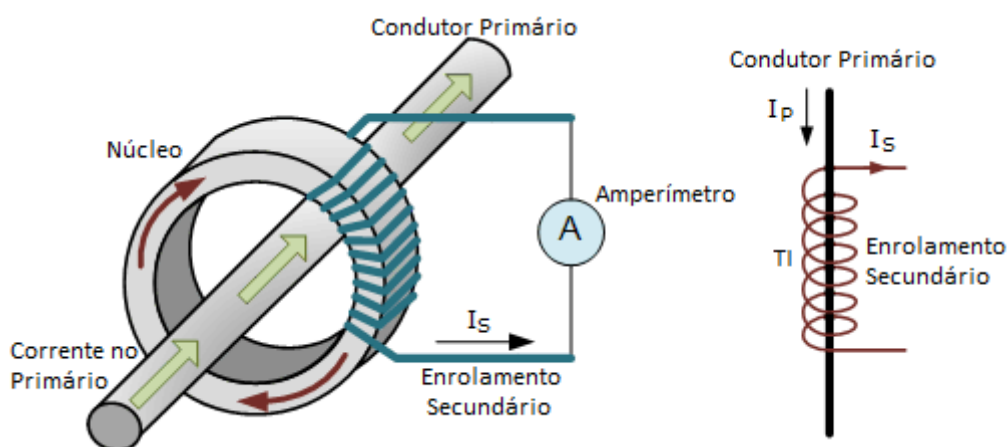


Fig. 4.19 - Princípio de funcionamento de um TI. [26]

O TI instalado deverá ter à sua saída, uma corrente superior a 0,2A, visto que para correntes inferiores, o relé varimétrico não funciona. Foram observadas algumas situações em que devido ao sobredimensionamento dos barramentos, os TIs instalados eram para correntes adequadas à secção utilizada mas sobredimensionados para os valores de corrente existentes. Para além da perda de precisão de funcionamento a bateria não funcionará com cargas baixas. Por exemplo um TI com uma relação de transformação 1600/5A apenas funcionará com correntes superiores a 64A. Apesar de 60A não parecer um valor desprezável, nestas condições a bateria não irá funcionar. Sabendo que este pormenor pode comprometer o correto funcionamento da bateria, caso estejam instalados TIs de relação de transformação francamente sobredimensionada, devem ser utilizados outros TIs de menor relação de

transformação, garantindo assim o correto funcionamento da bateria e a melhoria da precisão das medições. Esta situação é bastante comum em instalações industriais onde ocorreu uma redução significativa da atividade industrial provocando uma redução significativa de carga. Nestas situações estamos perante uma instalação sobredimensionada para as necessidades atuais. Também se verifica este problema em locais onde existe uma grande diferença entre o consumo máximo e o consumo médio da instalação. A instalação está preparada para potências superiores à do consumo máximo. Se existirem períodos relativamente grandes, onde o consumo é mínimo, mesmo perante um mau fator de potência, a bateria pode não funcionar devido a falta de corrente no secundário do TI.

Alguns sistemas mais antigos para funcionarem corretamente, necessitam do cálculo de um parâmetro denominado C.K. que varia com a resolução e a razão de transformação do TI que fornece os valores de corrente ao relé varimétrico.

$$C.K. = \frac{Q_p}{\sqrt{3} \times V \times \frac{I_p}{I_s}} \quad (4.14)$$

Onde,

$Q_p$  – Potência do menor grupo da bateria (também conhecido por resolução);

$V$  – Tensão aplicada;

$I_p$  – Corrente máxima do primário do TI;

$I_s$  – Corrente máxima do secundário do TI.

No entanto, este requisito praticamente só se encontra durante operações de manutenção ou otimização de unidades antigas ou pelo menos obsoletas, que ainda utilizam potenciômetros como entradas de parâmetros. Hoje em dia, o fornecimento da razão de transformação do TI é suficiente para o funcionamento da unidade.

Com os valores das tensões e das correntes é possível determinar todas as potências e consequentemente os requisitos de compensação da instalação. Os TIs podem ser abertos ou fechados. Os fechados são mais económicos mas exigem a desconexão dos cabos onde devem ser instalados para que possam ser inseridos. Os TIs abertos já facilitam bastante a sua instalação devido ao facto de dispensarem a desconexão de cabos ou barramentos para que possam ser instalados. Se existirem vários transformadores ou vários pontos a compensar para uma única bateria deve ser utilizado um TI somador que acaba por combinar as correntes de vários TIs numa única saída de corrente. Tipicamente para este tipo de controlo só é utilizado um TI para medir a corrente de uma fase. Se houver equilíbrio de fases em termos de carga, não haverá qualquer problema. Se as fases não forem equilibradas em termos de carga, corremos o risco de efetuar uma compensação incorreta. Se a carga da fase em que está a ser medida a corrente for significativamente menor que nas restantes, a potência reativa fornecida pela bateria será inferior à pretendida. Se for superior às restantes, poderemos estar numa situação de sobrecompensação devido ao excesso de potência reativa fornecida.

Os contactores (Fig. 4.20) são responsáveis pela ligação dos diversos grupos de condensadores. Estes não são contactores convencionais visto que têm de estar equipados com resistências de descarga para atenuarem os picos de corrente dos condensadores no momento que estes são

ligados. Os picos de corrente podem ser 200 vezes superiores aos valores nominais. Sem estas resistências de descarga, os picos de corrente iriam reduzir o período de vida útil dos condensadores podendo mesmo destruí-los.

Estes elementos possuem algumas vantagens e desvantagens,

**Vantagens:** Economia, simplicidade de instalação e substituição, disponibilidade no mercado.

**Desvantagens:** Nº limitado de operações (entre 100.000 a 200.000), desgaste mecânico, problemas de funcionamento com poeiras.



Fig. 4.20 - Contactor com módulo de descarga. [26]

O sistema de controlo mais vulgarmente conhecido por relé varimétrico é constituído por diversos relés que de acordo com as necessidades de compensação da carga, estabelecem o contacto que atraca a bobine do contactor do grupo ou vários grupos de condensadores que se pretendam ligar. Estes sistemas podem ter mais funções que a simples gestão da potência a compensar. Podemos ter acesso a tensões simples e compostas, valor instantâneo da corrente que circula na fase onde o TI está montado, temperatura, distorção harmónica total, potência ativa, potência reativa, potência aparente, informações de alarme/erro, etc.



Fig. 4.21 - Bateria de condensadores convencional de 35kVAr.

Alguns destes sistemas de controlo conseguem ter tempos de reacção bastante rápidos tendo em conta a simplicidade da tecnologia. Se a carga for relativamente estável nas suas transições, o tempo de reacção é próximo dos 5 segundos. Este tempo de reacção não pode ser considerado para todas as situações devido a uma limitação técnica dos condensadores. Estes requerem um tempo de descarga que pode atingir os 3 minutos para que estes descarreguem até a um máximo de 75V. Como já tinha sido referido, as resistências de descarga atuais podem descarregar os condensadores até um valor próximo dos 10% da sua tensão nominal. Assim sendo após um minuto temos uma tensão inferior a 50V. É necessário aguardar cerca de 1 minuto para ligar novamente um grupo para evitar a ligação deste com uma carga significativa, o que levaria ao seu desgaste prematuro e possível danificação. Este tempo de espera pode ser alterado pelo utilizador. Obviamente que um maior intervalo de tempo permite uma maior descarga o que reduziria significativamente o desgaste dos condensadores mas este aumento do intervalo de tempo pode impedir que a bateria de condensadores seja capaz de acompanhar as necessidades de compensação da carga. Se o intervalo de tempo for encurtado para períodos inferiores a 1 minuto, o acompanhamento das necessidades da carga é muito melhor mas nessa situação estaremos a expor os condensadores a maior desgaste e risco de destruição.

Os sistemas da Schneider/Nokian demoram aproximadamente 1 minuto para qualquer variação de carga, independentemente de se tratar de uma religação de um grupo ou se estamos perante a entrada em serviço de um grupo de condensadores que não funcionou nos últimos minutos. Mesmo numa situação de retirar um grupo devido a uma diminuição das necessidades de compensação da carga, estes sistemas mantêm a sua lentidão, o que os torna excessiva e desnecessariamente lentos face à concorrência.

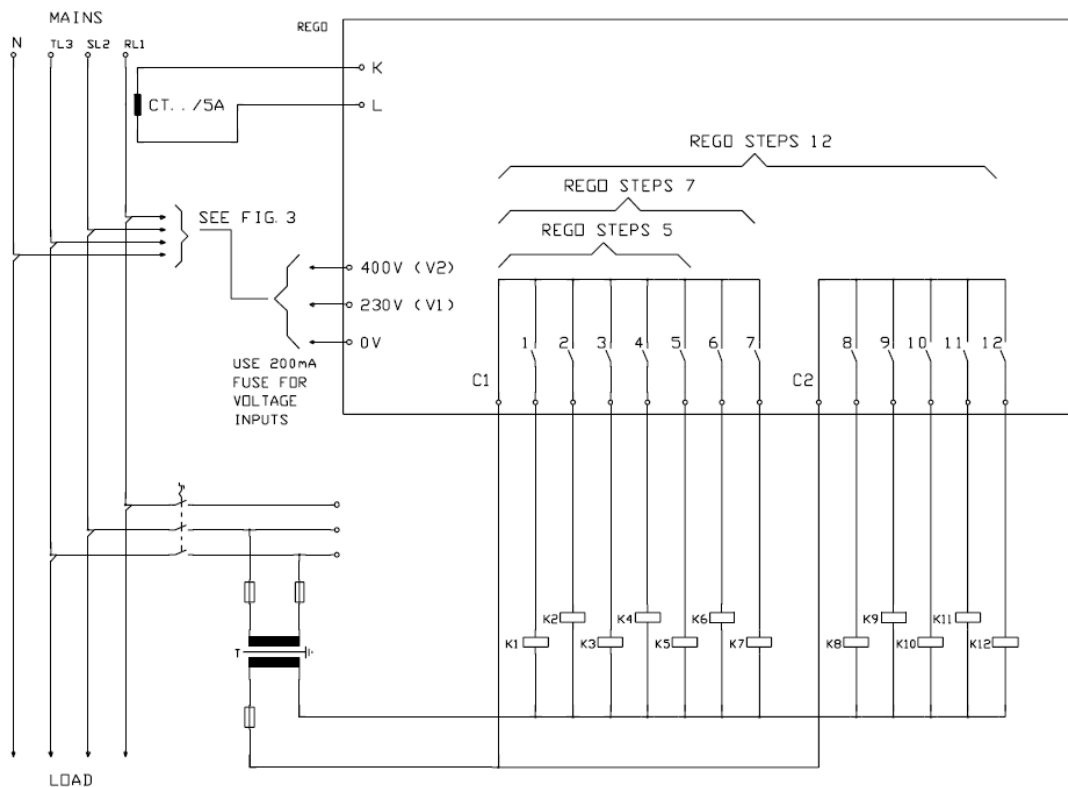


Fig. 4.22 - Esquema de controlo de uma bateria de condensadores convencional. [21]

### 4.2.2.3 - Controlador e tiristor

Este tipo de tecnologia apresenta uma evolução significativa face às baterias de condensadores convencionais. Os controladores apresentam-se como analisadores de energia simples com muito mais funções para além da mera gestão da compensação de potência reativa. Para além dos parâmetros disponíveis para os relés varimétricos convencionais, os controladores permitem contabilizar a energia (ativa, reativa e aparente) consumida pela carga, fornecida pela bateria e combinada. Estes podem também guardar um histórico de alarmes de temperatura, problemas de comutação, fusíveis destruídos, variações de tensão, ressonância, capacidade baixa, etc. Alguns modelos mais evoluídos permitem a visualização das formas de onda da tensão e da corrente e do espectro de harmónicos.

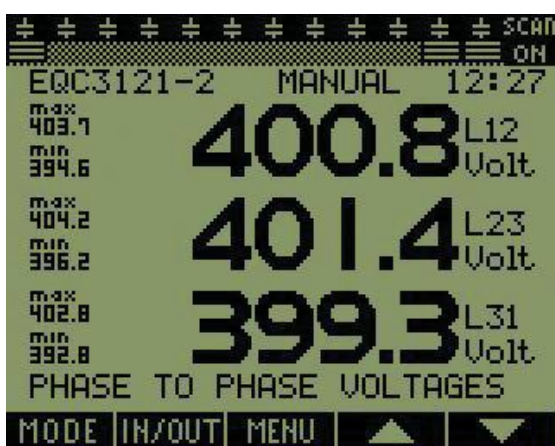


Fig. 4.23 - Visualização das Tensões compostas. [28]

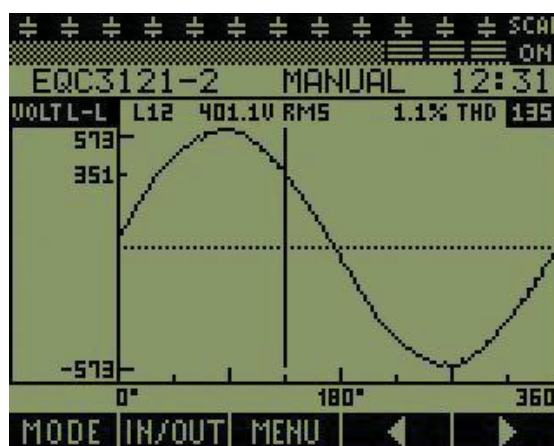


Fig. 4.24 - Visualização Formas de Onda da Tensão. [28]

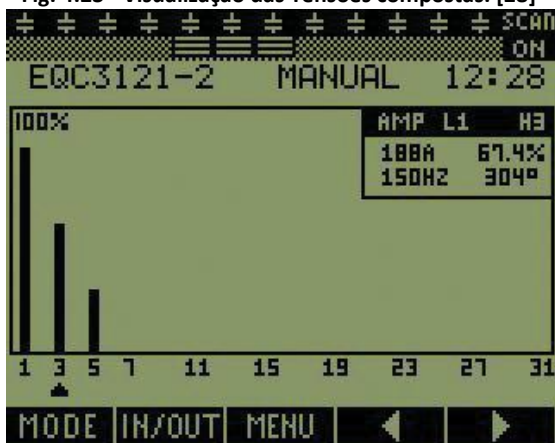


Fig. 4.25 - Visualização do Espectro de Harmónicos. [28]

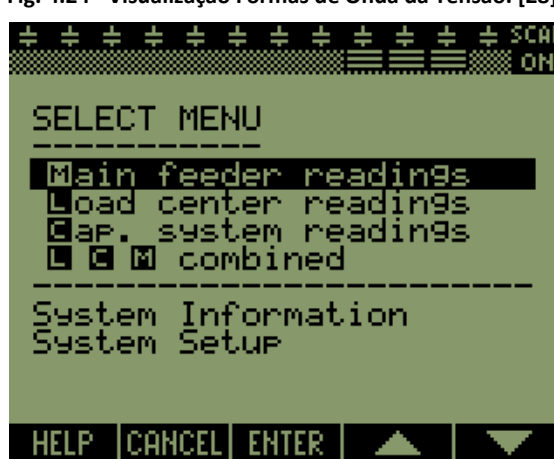


Fig. 4.26- Totalizadores de Energia. [28]

Associados a este tipo de controlo estão módulos de comutação por tiristores que permitem tempos de reação inferiores a 20ms e comparativamente à ação mecânica dos contactores, minimizam significativamente os picos de corrente gerados pela comutação de grupos. Esta rapidez de resposta permite acompanhar a carga em tempo real, não existindo consumo nem fornecimento de quantidades de energia significativas devido à lentidão do elemento de controlo da bateria. Como o fator de potência é praticamente constante, a tensão é muito mais estável. O facto da comutação dos grupos ser feita à passagem por 0V da forma de onda da tensão elimina praticamente na totalidade quaisquer picos de corrente gerados pela ligação do grupo de condensadores. O facto desta tecnologia permitir uma forte mitigação dos picos

de corrente originados pela ligação dos condensadores, permite que os grupos voltem a ser ligados poucos instantes após serem desligados sem qualquer consideração pelos tempos de descarga dos condensadores. Outra possibilidade que este tipo de controlo associado à comutação por tirístores permite é o funcionamento alternado de grupos de potência igual quando a carga é estável. Desta forma não existe mais desgaste em um ou dois grupos que fiquem ligados durante todo o intervalo de tempo que não ocorra variação de carga, pois a cada 5 segundos existe uma troca entre os grupos sem variação da potência compensada nem picos de corrente significativos. Para além do aumento da longevidade dos condensadores, as perdas por aquecimento são minimizadas.



Fig. 4.27 - Módulo de comutação por tirístores. [28]

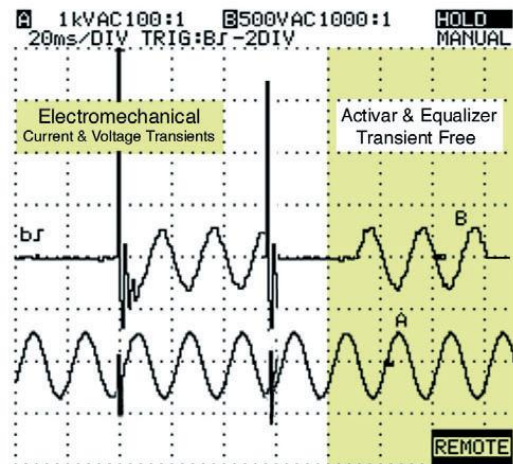


Fig. 4.28 - Diferenças entre a comutação por contactores e por tirístores. [28]

Durante vários ensaios de sistemas equipados com estes módulos de comutação foram detetadas anomalias nos instantes da comutação dos grupos de condensadores. Algumas unidades evidenciaram picos de corrente nas transições entre os 6A e os 30A funcionando de resto dentro da normalidade. Apesar de não constituírem nada de significativamente prejudicial para a saúde dos condensadores, acaba por não se verificar na prática a ausência de picos transitórios nos momentos de comutação dos grupos em algumas unidades. Uma das unidades chegou a apresentar picos de corrente na ordem dos 2000A que provocavam o disparo de proteções. A conclusão a que se chegou é que estes picos de corrente deviam-se a soldas mal efetuadas nos terminais dos tirístores provocando sobreaquecimento e destruição de elementos da placa onde estavam montados.



Fig. 4.29 - Corrente medida à saída de uma bateria de condensadores de 550kVAr equipada com módulos de comutação por tiristor que exibiam picos de corrente na sua operação.

No ponto de medição da figura anterior foram efetuadas várias comutações forçadas por segundo para provocar o surgimento dos picos de corrente. Foram verificadas situações em que os picos de corrente eram superiores a 250A.

## 4.3 - Filtragem de harmônicos

### 4.3.1 - Filtros passivos

#### 4.3.1.1 - Ressonância Paralela

As cargas não lineares possuem uma impedância variável, o que faz com que a forma de onda da corrente seja significativamente diferente da tensão. Para simplificar podemos dizer que as cargas não lineares se comportam como um grupo de cargas lineares em paralelo com uma fonte de corrente harmônica. Idealmente as fontes de corrente possuem uma impedância infinita. Toda a corrente criada por esta fonte de corrente irá fluir para o ponto de impedância mais baixa. Idealmente as fontes de tensão possuem uma impedância baixa. [29]

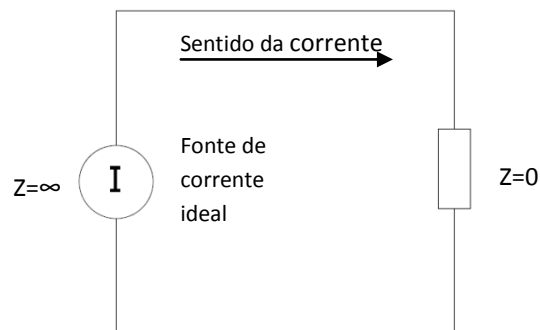


Fig. 4.30 - Fonte de corrente ideal.

Neste caso, o transformador é o ponto de ligação com a rede e a fonte de tensão. Posto isto, a grande maioria do conteúdo harmônico vai fluir para o transformador. Este fluxo de corrente harmônica através dos condutores e dos enrolamentos do transformador provocam oscilações dentro da mesma gama de frequências sobre a forma de onda da tensão. É desta forma que são originados os harmônicos de tensão. Por sua vez, os harmônicos de tensão embora relativamente pequenos, criarão flutuações de tensão na rede. [29]

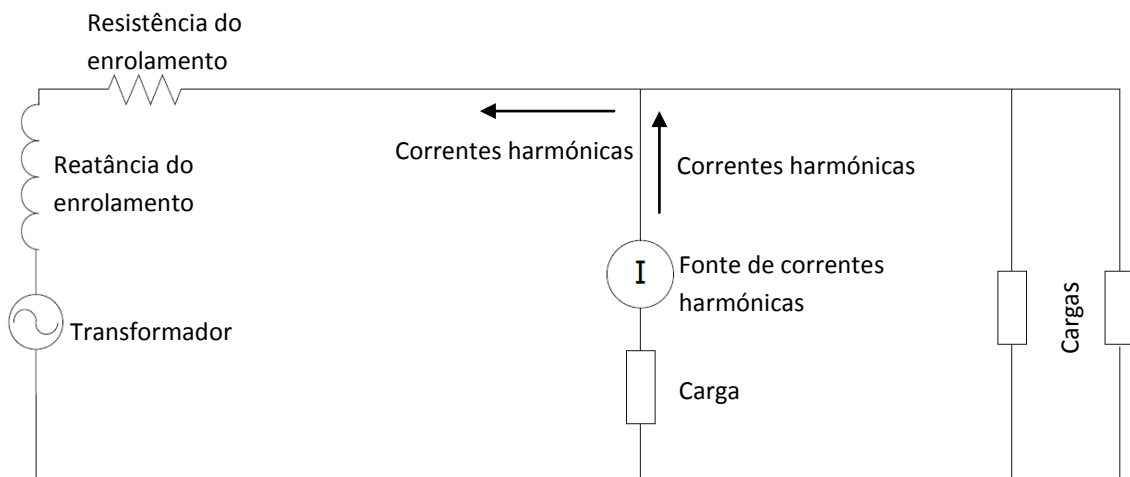


Fig. 4.31 - Esquema de uma unidade com cargas produtoras de harmônicos.

Como é típico na grande maioria das instalações industriais, é efetuada a correção do fator de potência com recurso a baterias de condensadores. Com esta configuração, é colocada uma reatância capacitiva em paralelo com o transformador que é uma reatância indutiva.

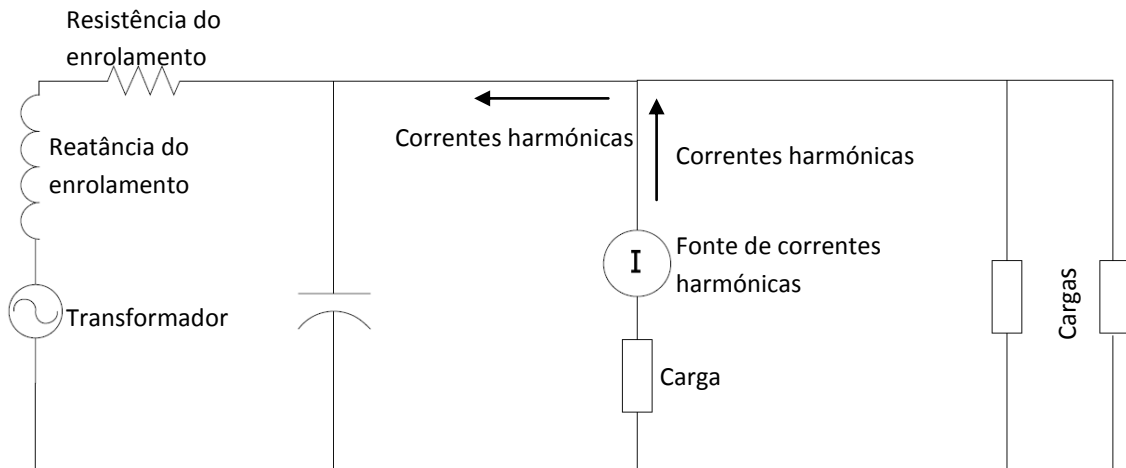


Fig. 4.32 - Esquema de uma unidade com cargas produtoras de harmônicos e com uma bateria de condensadores instalada.

Nestas condições é criado um circuito ressonante para harmônicos cuja frequência permita que a reatância indutiva  $X_L$  seja igual à reatância capacitiva  $X_C$ .

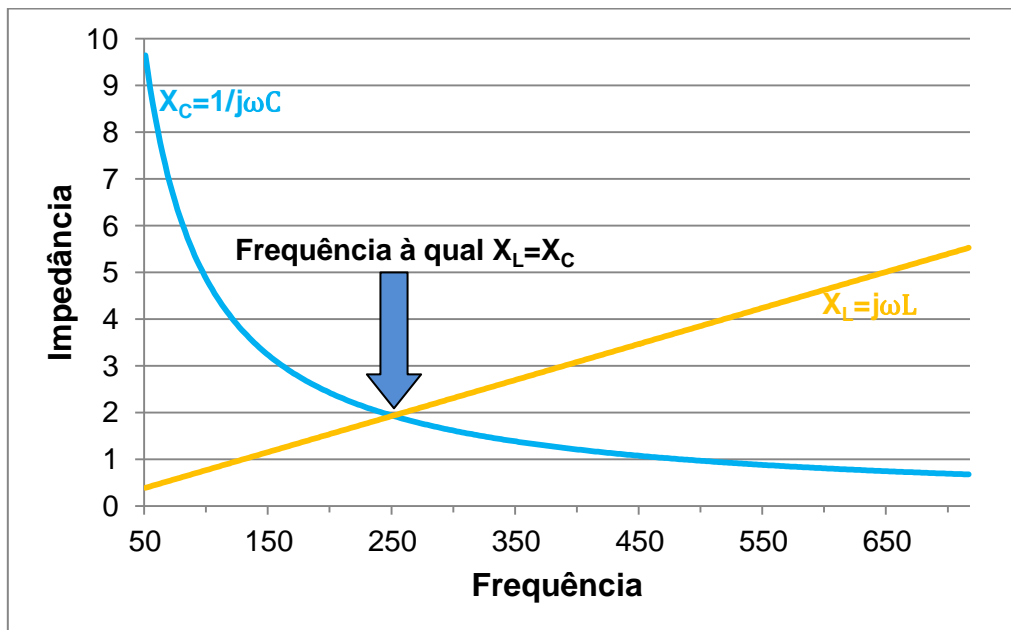


Fig. 4.33 - Frequência de ressonância.

Em condições de ressonância paralela, a impedância do circuito formado pela bateria de condensadores em paralelo com o transformador, tende para infinito. Como a impedância desta parte do circuito para frequências às quais ocorre ressonância, ou apenas próximas destas se torna extremamente elevada, as correntes harmônicas criadas pela carga são forçadas a retornar à carga. [29]

O aumento da impedância provoca o aumento da amplitude dos harmônicos de tensão. Em condições de ressonância a distorção harmônica da tensão condiciona significativamente a qualidade de energia das instalações vizinhas. Vulgarmente quando estas situações ocorrem, os condensadores sendo o elemento mais frágil do circuito ressonante, acabam por se destruir, tanto por expansão como explosão. Em situações onde os picos de ressonância são

mais violentos podemos ter vários equipamentos danificados para além dos condensadores e fusíveis.

Se apenas existirem elementos indutivos na instalação, a impedância tem uma evolução linear com a frequência, mas à medida que são ligados grupos de condensadores, o valor da impedância e conseqüentemente a frequência de ressonância variam bastante. Quanto maior for o número de grupos de condensadores mais baixa será a frequência de ressonância. Admitindo que a resistência dos elementos é nula, a expressão da impedância para estas condições é dada por,

$$\begin{aligned}
 Z &= \left[ \frac{1}{N} (Z_C + Z_L) \right] \parallel Z_{LTR} \Leftrightarrow Z = \left[ \frac{1}{N} (X_C + X_L) \right] \parallel X_{LTR} \\
 \Leftrightarrow Z &= \frac{\frac{1}{N} \left( \frac{1}{j\omega C} + j\omega L \right) j\omega L_{TR}}{\frac{1}{N} \left( \frac{1}{j\omega C} + j\omega L \right) + j\omega L_{TR}} \Leftrightarrow Z = \frac{\frac{L_{TR}}{C} - \omega^2 L L_{TR}}{1 - \omega^2 C L - \omega^2 C L_{TR} N} \quad (4.15) \\
 \Leftrightarrow Z &= \frac{L_{TR} \left( \frac{1}{C} - \omega^2 L \right) j\omega C}{1 - \omega^2 C L - \omega^2 C L_{TR} N} \Leftrightarrow Z = \frac{L_{TR} (1 - \omega^2 L C) j\omega}{1 - \omega^2 C L - \omega^2 C L_{TR} N}
 \end{aligned}$$

Onde:

$Z_C = X_C$  – Reatância do condensador

$Z_L = X_L$  – Reatância do filtro de harmônicos

$Z_{LTR} = X_{LTR}$  – Reatância do transformador

$N$  – Número de grupos ligados

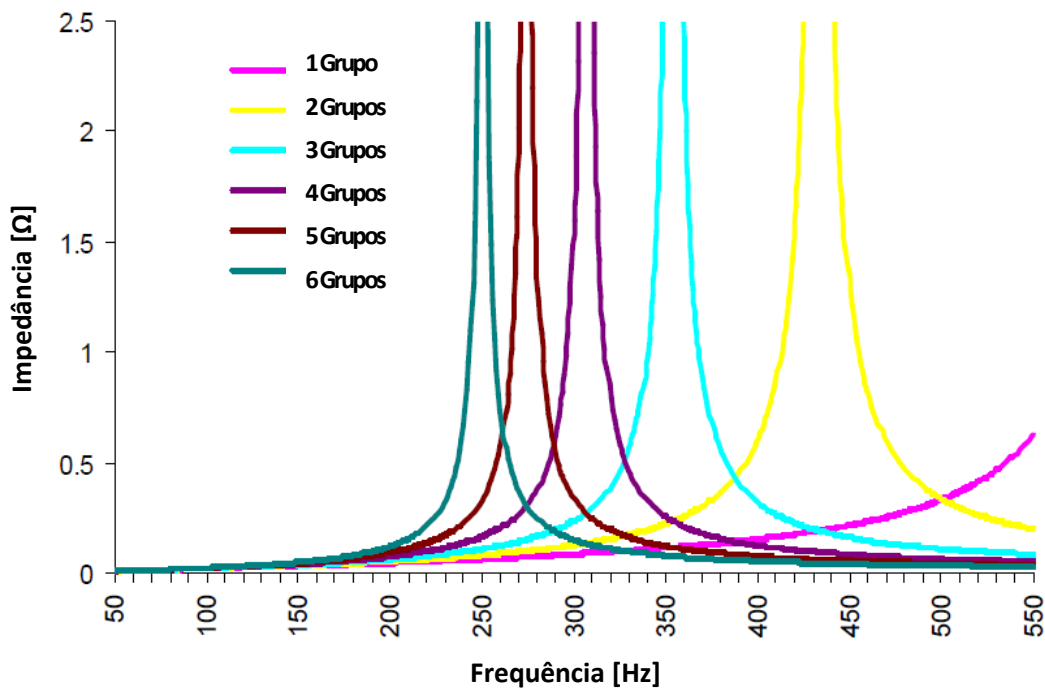


Fig. 4.34 - Valores da impedância de acordo com o nº de grupos utilizados. [29]

Sabendo que o 5º harmônico (250Hz) é o mais comum nas instalações, podemos verificar que numa situação em que estejam todos os grupos ligados, estamos perante uma situação de ressonância paralela. A solução para este tipo de problema reside na colocação de uma reactância em série com os condensadores, alterando o comportamento da impedância do circuito face a diferentes frequências e nº de grupos utilizados. O grande objetivo da introdução de uma reactância em série com os condensadores é “desviar” a frequência de ressonância do circuito para valores mais baixos, onde não existam harmônicos que constituam motivo de preocupação. [29]

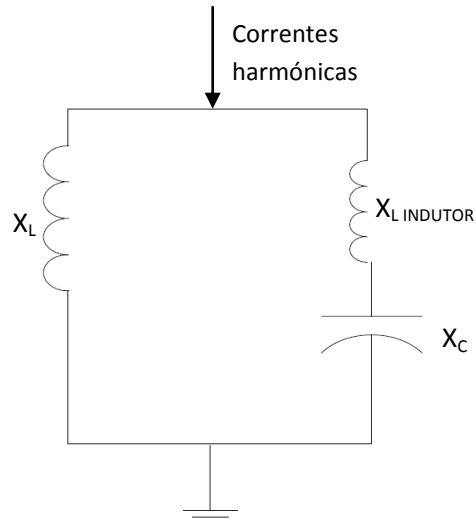


Fig. 4.35 - Nova configuração do circuito após instalação do indutor em série para cada grupo de condensadores.

A frequência de ressonância de um circuito paralelo ocorre quando a impedância é máxima. No caso de um circuito série, a frequência de ressonância ocorre quando a impedância é zero. Quando introduzimos uma reactância em série com os condensadores, a frequência de ressonância é aquela à qual a impedância é nula. [29]

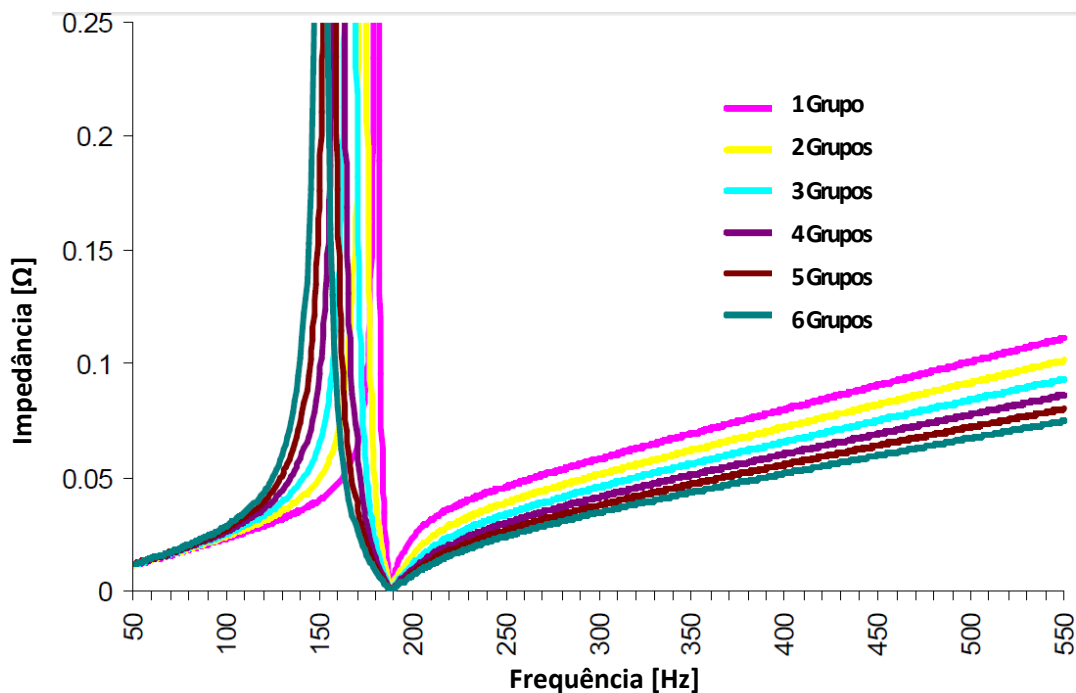


Fig. 4.36 - Impedância do circuito com condensadores e indutores de 7%. [29]

Os indutores mais comuns são os de 7%. Estes possuem uma frequência de ressonância de 189Hz, o que a situa entre o 3º e o 4º harmónico. Em condições normais, as frequências próximas dos 189Hz são consideradas seguras. Os harmónicos pares só existem em cargas desequilibradas entre fases, o que, exceção feita a instalações de soldadura, não é usual na indústria.

Apesar da frequência de ressonância dos indutores de 7% ser próxima da frequência do 3º harmónico, se houver equilíbrio entre as 3 fases, o 3º harmónico não constitui problema.

Sabendo que a tensão é dada por,

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \theta_v) \quad (4.16)$$

E que o 3º harmónico possui uma frequência 3 vezes superior à fundamental, temos:

$$v_{H3}(t) = V_m \cos(3 \times \omega t + 3 \times \theta_v) \quad (4.17)$$

As tensões simples das componentes do 3º harmónico, são dadas por,

$$v_{1H3}(t) = V_{m1} \cos(3 \times \omega t + 3 \times 0^\circ) = V_{m1} \cos(3 \times \omega t) \quad (4.18)$$

$$v_{2H3}(t) = V_{m2} \cos(3 \times \omega t + 3 \times 120^\circ) = V_{m2} \cos(3 \times \omega t + 360^\circ) \quad (4.19)$$

A tensão composta do 3º harmónico é dada por,

$$v_{12H3}(t) = v_{1H3}(t) - v_{2H3}(t) = V_{m1} \cos(3 \times \omega t) - V_{m2} \cos(3 \times \omega t + 360^\circ) \quad (4.20)$$

Como  $0^\circ = 360^\circ$ , se estivermos perante tensões equilibradas com a mesma amplitude, o valor da tensão composta do 3º harmónico é nulo. Pela mesma razão todos os harmónicos múltiplos de 3 (3º, 6º, 9º, 12º, 15º...) terão valores compostos nulos. Se os condensadores estiverem ligados em triângulo, tanto em ligação interna como externa, os valores simples das componentes harmónicas tornam-se irrelevantes. Podemos concluir que com fases equilibradas e condensadores ligados em triângulo, as baterias de condensadores equipadas com indutores de 7% são imunes a harmónicos de 3ª ordem. [29]

É sempre necessário realizar uma análise às características da rede e da carga. Por vezes as condições existentes afastam-se do comum e torna-se necessário utilizar indutores de 14% caso existam desequilíbrios entre fases. Esta solução permite baixar a frequência de ressonância para 134Hz, ficando abaixo do 3º harmónico. Se os valores de THD forem muito elevados, deve proceder-se à filtragem dos harmónicos predominantes e não apenas evitar situações de ressonância. Os indutores de 5,67% (210Hz) são os mais indicados para esse efeito. Os indutores de 5,67%, 7% e 14% como visam afastar a frequência de ressonância são designados por soluções dessintonizadas. [29]

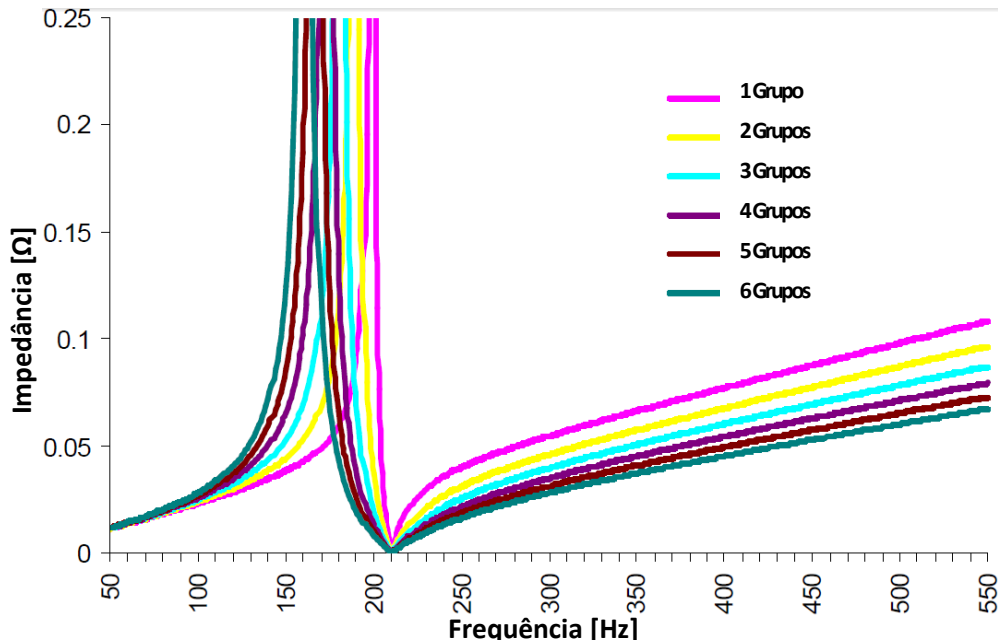


Fig. 4.37 - Impedância do circuito com condensadores e indutores de 5,67%. [29]

No âmbito da qualidade da energia é possível introduzir um filtro em série com uma carga muito poluidora em conteúdo harmónico. Um filtro nessas condições deve ter uma frequência de ressonância próxima da frequência do harmónico predominante mas nunca ser igual. Dessa forma a maior parte dos harmónicos será filtrada, protegendo a restante instalação. Este exemplo trata-se de uma solução sintonizada. Um indutor de 5,67% é a medida *standard* que mais se aproxima destas condições e permite resultados aceitáveis.

#### 4.3.1.2 - Fator de redução

O fator de redução determina a frequência de ressonância do circuito e consiste na percentagem da reatância indutiva face à reatância capacitiva.

$$p\% = \frac{X_L}{X_C} \quad (4.21)$$

$$p\% = \left(\frac{f_n}{f_r}\right)^2 \times 100\% \quad (4.22)$$

A frequência de ressonância obtém-se da seguinte forma:

$$f_r = \frac{f_n}{\sqrt{p}} \quad (4.23)$$

$$f_{5,67\%} = \frac{50}{\sqrt{0,0567}} = 210Hz \quad (4.24)$$

$$f_{7\%} = \frac{50}{\sqrt{0,07}} = 189Hz \quad (4.25)$$

$$f_{14\%} = \frac{50}{\sqrt{0,14}} = 134\text{Hz} \quad (4.26)$$

Indutor [Hz]	Frequência de ressonância [Hz]	Interharmônico
5,67	210	4,2
7	189	3,78
14	134	2,67

Tabela 4.10 - Frequências de ressonância e ordens de interharmônicas de acordo com o fator de redução

Conhecendo a potência do grupo de condensadores, ou a capacidade destes, torna-se fácil determinar a indutância a colocar em série com os condensadores para obter o fator de redução pretendido.

$$Q = \frac{V^2}{X_C} \Leftrightarrow X_C = \frac{V^2}{Q} \quad (4.27)$$

Como,

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \Leftrightarrow C = \frac{1}{2\pi fX_C} \quad (4.28)$$

Substituindo  $X_C$  obtemos o valor da capacidade a partir da potência, frequência e tensão aplicada.

$$C = \frac{Q}{2\pi fV^2} \quad (4.29)$$

Como já sabemos o valor do fator de redução pretendido e a capacidade pela expressão anterior, obtemos a indutância a partir da seguinte expressão,

$$p\% = \frac{X_L}{X_C} = \omega^2 LC \Leftrightarrow L = \frac{p\%}{\omega^2 C} \quad (4.30)$$

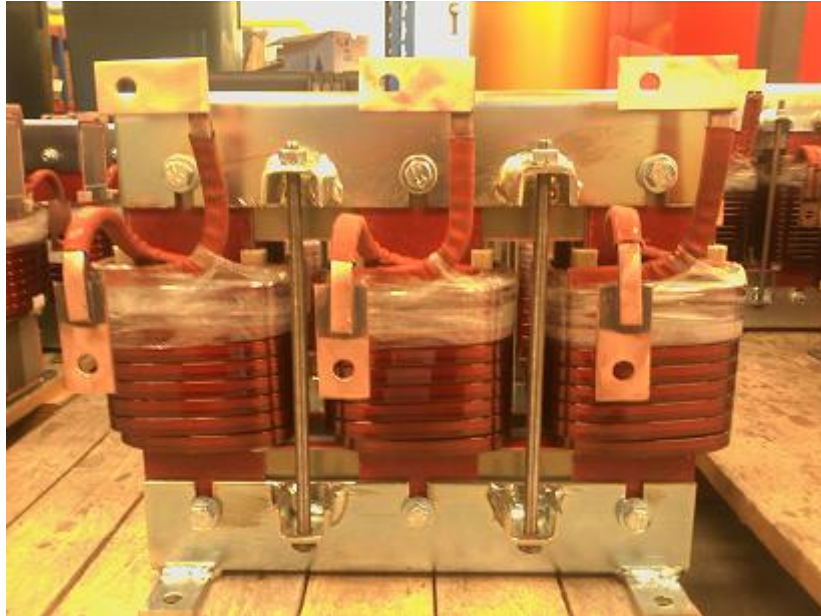
*Exemplo:*

Pretende-se um indutor de 7% para um grupo de condensadores com 25kVAR.

$$C = \frac{Q}{2\pi fV^2} = \frac{25 \times 10^3}{2\pi 50 \times 400^2} = 497,36\mu F \quad (4.31)$$

$$L = \frac{p\%}{\omega^2 C} = \frac{0,07}{(2\pi \times 50)^2 \times 497,36 \times 10^{-6}} = 1,43\text{mH} \quad (4.32)$$

Sabemos assim que um indutor de 7% projetado para um grupo de condensadores de 25kVAR de potência terá 1,43mH de indutância.



**Fig. 4.38 - Indutor trifásico para filtragem de harmônicos.**

#### **4.3.2 - Filtros ativos**

Outra alternativa para filtragem de harmônicos são os filtros ativos (Fig. 4.39). Na sua essência um filtro ativo é um elemento produtor de harmônicos em oposição de fase com os harmônicos de corrente gerados pela carga. Desta forma, a soma das duas componentes harmônicas anula-se dando origem a sinusoides mais próximas da forma original.



**Fig. 4.39 - Filtro Ativo.**

O modo de funcionamento de um filtro ativo (Fig. 4.40) consiste nos seguintes aspetos. O TI que mede as correntes harmónicas produzidas pela carga, fornece uma saída analógica. Esse sinal analógico é por sua vez convertido num sinal digital através de um conversor A/D. Sendo assim, são fornecidas as medições ao dispositivo de controlo, que por sua vez adquire informação tendo em contas das necessidades do utilizador. A unidade de controlo produz as correntes harmónicas através de um modulador PWM, em oposição de fase com as correntes harmónicas produzidas pela carga. TIs internos dão feedback às unidades de controlo acerca da corrente debitada PWM de forma a serem efetuados ajustes à forma de onda da corrente produzida. [21]

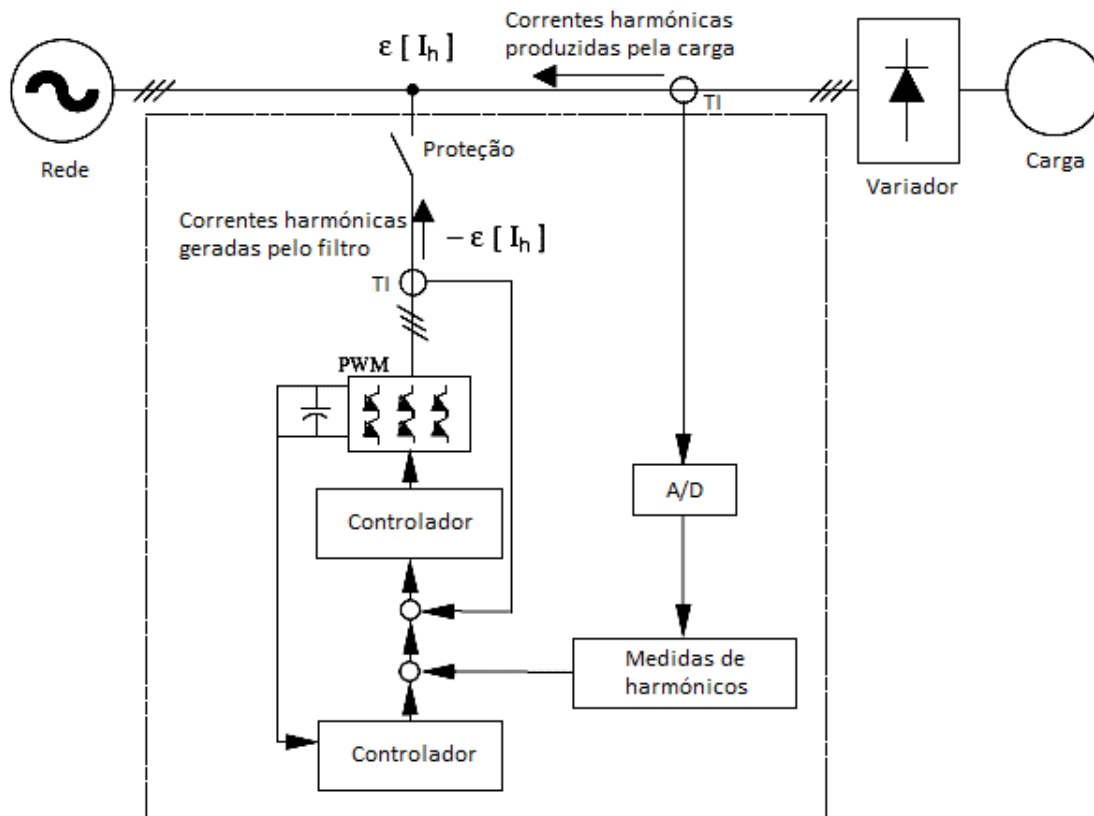


Fig. 4.40 - Esquema de funcionamento de um filtro ativo. [21]

Como se pode verificar na Fig. 4.41, que ilustra o espectro de harmónicos de uma instalação de celulose, apesar dos harmónicos de 5ª ordem serem de longe os predominantes, temos uma presença significativa dos harmónicos de 7ª, 11ª, e 17ª ordem. É claramente visível na Fig. 4.42, que a forma de onda da corrente, nada tem a ver com a forma de onda da tensão. Com a intervenção de um filtro ativo, a injeção no circuito de frequências harmónicas em oposição de fase com as produzidas pela carga, elimina a grande maioria da distorção harmónica existente, como podemos verificar na Fig. 4.43. A forma de onda de corrente que se produz, assume a forma de uma senoide quase perfeita, como é visível na Fig. 4.44. São notórios pontos de distorção na forma de onda da tensão, no entanto essa distorção é causada por elementos na rede e não causam distúrbios assinaláveis na forma de onda da corrente. De ter-se em atenção que esta configuração do filtro ativo utilizada neste exemplo, não realiza a correção do fator de potência, visto que se limita a compensar os harmónicos. [30]

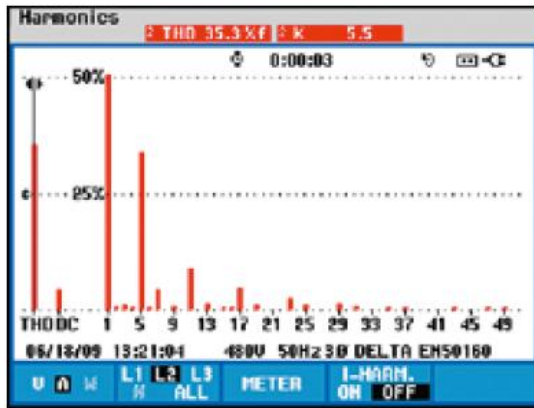


Fig. 4.41 - Espectro harmônico antes da compensação. [30]

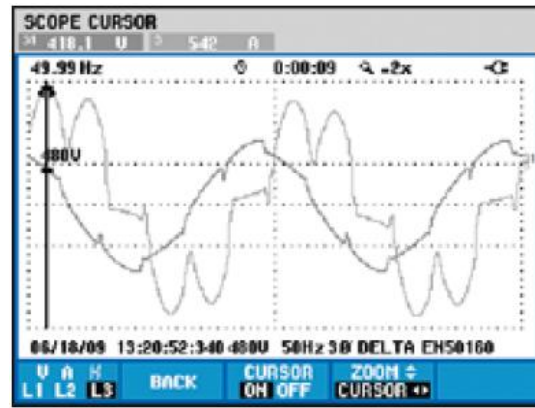


Fig. 4.42 - Formas de onda da tensão e da corrente antes da compensação. [30]

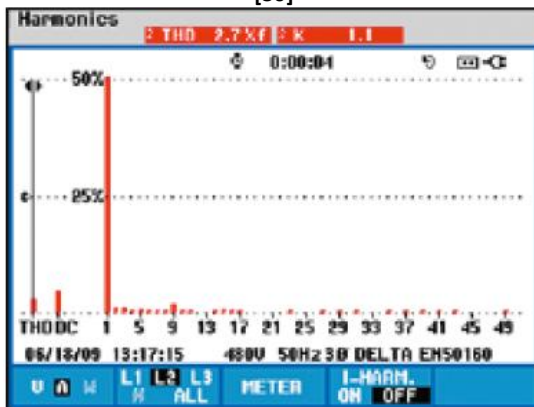


Fig. 4.43 - Espectro harmônico após a compensação. [30]

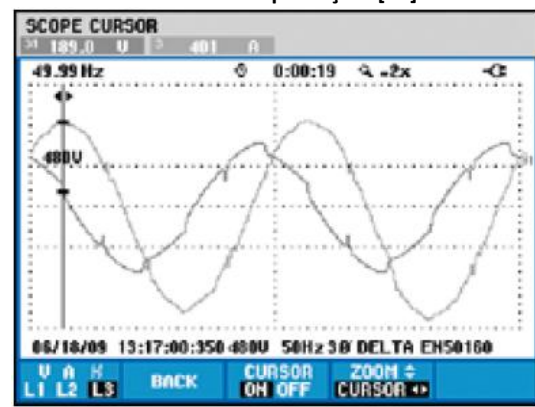


Fig. 4.44 - Formas de onda da tensão e da corrente após a compensação. [30]

Uma das principais limitações desta tecnologia é a corrente máxima que estes podem debitar continuamente. A Schaffner disponibiliza sistemas capazes de debitar um máximo de 300A. No entanto, a Circutor disponibiliza um máximo de 200A e a Ducati Energia 120A. Como vimos anteriormente num exemplo concreto, uma única ordem de harmônicos atingiu valores próximos dos 600A. Para contornar este problema é possível instalar filtros ativos em paralelo, até um máximo de 8 unidades no caso da Circutor e da Ducati. No caso da Schaffner, apenas é possível ligar 5 sistemas em paralelo. Teoricamente é possível obter uma corrente máxima de 1500A utilizando sistemas da Schaffner, 1600A utilizando sistemas da Circutor e de 960A para sistemas da Ducati Energia. O grande problema desta solução é o seu custo. O preço tabela de um filtro ativo de 120A da Ducati Energia é de 23.490€. O que indica que, se fosse necessário utilizar 960A para filtragem de harmônicos, o custo total atingiria os 187.920€. Um sistema projetado para este nível de potências, recorrendo a filtragem passiva de harmônicos e comutação por tirístores tem um custo aproximado de 33.000€. Sabendo que a Ducati Energia é das marcas mais acessíveis do mercado e tendo em conta o custo de um sistema de correção do fator de potência com filtragem de harmônicos e comutação por tirístores, capaz de lidar com a mesma potência, é evidente que esta tecnologia é caríssima face às restantes.

Outro dos problemas reside na necessidade destes sistemas terem de efetuar a correção do fator de potência com parte da corrente disponível o que vai reservar uma parcela significativa da corrente injetada pelo filtro ativo. É possível regular o valor do fator de potência a apresentar de forma a libertar corrente para a correção do conteúdo harmónico. Outra solução passa por selecionar as ordens ímpares de harmónicos a compensar (Fig. 4.45). Podemos assim ignorar a compensação de ordens com valores mais baixos de distorção, para que o filtro ativo tenha mais corrente disponível para compensar as ordens de harmónicos que mais contribuem para o valor da THD.



Fig. 4.45 - Seleção das ordens a compensar. [31]

Um conceito válido de implementação desta tecnologia resulta numa solução híbrida de filtragem de harmónicos, combinando a maior capacidade dos filtros passivos em lidarem com correntes mais elevadas e a rapidez e precisão dos filtros ativos em eliminarem a distorção harmónica. No entanto os dois elementos nos quais foi testada a validade deste conceito acabaram por ficar com os módulos de filtragem ativa destruídos prematuramente. Face a sistemas de filtragem passiva, os sistemas de filtragem ativa possuem maior abundância de elementos eletrónicos, atingem temperaturas mais elevadas e têm mecanismos de refrigeração mais complexos o que os faz por natureza mais suscetíveis a avarias.

Como pontos a reter acerca dos filtros ativos:

- Capacidade de compensar a totalidade do conteúdo harmónico;
- Rápida resposta a variações no comportamento da carga;
- Custo elevado face a sistemas de filtragem passiva;
- Baixo nível de corrente por cada unidade;
- Fiabilidade por vezes problemática.

Apesar do inegável valor desta solução, apenas é justificável a utilização de filtragem ativa de harmónicos em instalações extremamente sensíveis a estes. Nunca devem ser instalados sem sistemas de correção do fator de potência com filtragem passiva de harmónicos, pois só assim um filtro ativo terá a maior parte do conteúdo harmónico mitigado e será praticamente dispensado da compensação de energia reativa. Desta forma o filtro ativo tem mais corrente disponível para compensação harmónica. Como foi visto anteriormente a utilização exclusiva de filtros ativos em paralelo revela-se exorbitante em termos de custo.

## 5. Métodos de cálculo ou estimativa da potência a compensar

Este capítulo pretende descrever três métodos utilizados para determinar a potência máxima do sistema a ser implementado. Pretende-se evidenciar a invalidade do método académico no dimensionamento de sistemas aplicados em instalações com algumas variações de carga. É apresentado um método alternativo que envolve maiores margens de segurança embora este também careça de rigor face às certezas dos valores fornecidos por medições contínuas do consumo energético de uma instalação.

### 5.1 - Método académico

Apesar de se tratar de uma abordagem ultrapassada, será feita uma descrição deste método para explicar as suas falhas e justificar a necessidade de métodos alternativos.

Segundo o método académico, pode-se determinar a quantidade de energia reativa a compensar da seguinte forma [32]:

A energia reativa consumida no período de horas fora do vazio corresponde à soma da energia reativa faturada com 40% da energia ativa consumida. Estes 40% devem-se ao facto de à data da realização do documento académico utilizado como referência, a energia reativa só era faturada na porção em que a  $\tan(\varphi)$  era superior a 0,4. O valor atual a partir do qual ocorre faturação é 0,3.

Como a  $\tan(\varphi)$  é definida por:

$$\tan(\varphi) = \frac{Q}{P} = \frac{E_{Reat.}}{E_{At.}} \quad (5.1)$$

Pode-se representar a quantidade de energia reativa referente a uma  $\tan(\varphi) = 0,4$  por,

$$\tan(\varphi) = 0,4 = \frac{E_{Reat.}}{E_{At.}} \Leftrightarrow E_{Reat.} = 0,4E_{At.} \quad (5.2)$$

Representando-se a totalidade da energia reativa e a respetiva  $\tan(\varphi)$  média por,

$$E_{Reat.FV} = E_{Reat.fat.} + 0,4E_{At.FV} \quad (5.3)$$

$$\tan(\mu)_{medFV} = \frac{E_{Reat.FV}}{E_{At.FV}} \quad (5.4)$$

Devemos lembrar que este valor da  $\tan(\varphi)$  é médio e obviamente, teremos períodos onde a  $\tan(\varphi)$  é mais elevada. Segundo este método a quantidade de potência reativa a compensar é definida pela diferença entre a  $\tan(\varphi)$  média verificada na fatura e a  $\tan(\varphi)$  desejada.

Utilizando a expressão definida anteriormente em que,

$$Q = P \times \tan(\varphi) \quad (5.5)$$

Obtemos,

$$Q_1 = P \times \tan(\varphi_1) \quad (5.6)$$

$$Q_2 = P \times \tan(\varphi_2) \quad (5.7)$$

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P(\tan \varphi_i - \tan \varphi_f) \quad (5.8)$$

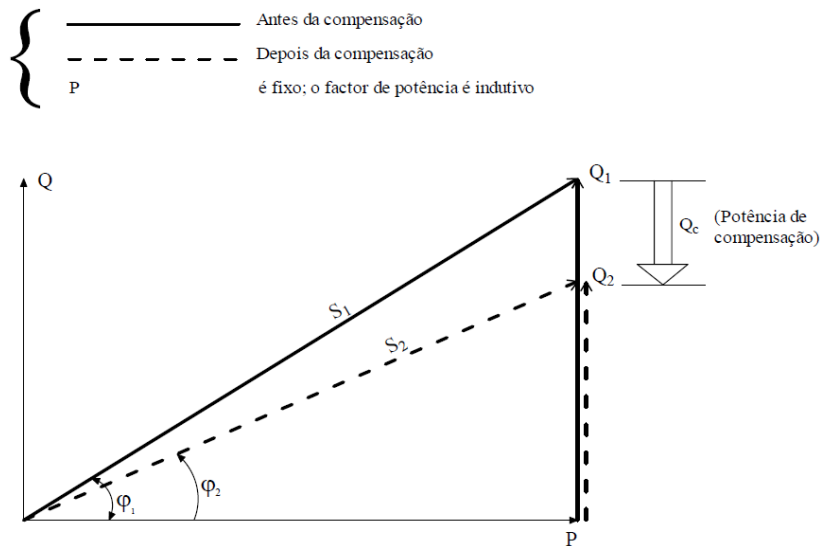


Fig. 5.1 - Potência a compensar. [32]

Obviamente que desta forma a potencia reativa não é totalmente compensada, a não ser que  $Q_2 = 0$ . Esta abordagem apenas é eficiente se o consumo de potência reativa for constante. No passado como o período de integração da energia reativa era mensal, não havia problema em usar valores médios mensais da  $\tan(\varphi)$ , visto que o período de integração correspondia à média mensal. Alguns fabricantes também recomendam esta abordagem e fazem acompanhar este conceito de uma tabela (Anexo 1) com diversos valores de  $\tan(\varphi)$  iniciais e finais, que indica a proporção de potência reativa a compensar face à potência ativa.

Esta abordagem é útil se for pretendida a compensação local de um ou vários elementos com regimes de funcionamento estáveis como motores, câmaras frigoríficas, etc. Como a compensação local é mais dispendiosa que a compensação global e que à luz da legislação atual que contempla períodos de integração diários, esta abordagem é inadequada à grande maioria dos casos. Qualquer sistema instalado deve ter a capacidade de compensar a totalidade da potência reativa instantânea de uma instalação. Se o nível de potência escolhido for unicamente obtido dos valores médios mensais e tiver como objetivo um fator de potência igual a 0,98, há um forte risco de ainda ocorrer faturação de energia reativa após a instalação de um sistema. O fator de potência objetivo deve ser sempre igual a 1,00 e deve haver especial atenção para as variações da carga ao longo dos períodos do dia e entre dias diferentes. No caso de uma instalação cujo diagrama de carga tenha diferenças em alguns dias, as necessidades calculadas com a média mensal serão inferiores às reais em períodos de maior consumo.

A título de exemplo analisemos o comportamento da carga de uma unidade de moagem de cereais, com recurso a um *software* de tratamento de dados recolhidos por um analisador avançado de energia. Como se pode ver na Fig. 5.2, existem períodos onde o consumo de potência reativa é próximo dos 30kVAr, enquanto noutros atinge os 250kVAr. Se a potência necessária para este local for obtida através da energia faturada mensalmente a potência média durante as horas fora de vazio é 82,41kVAr.

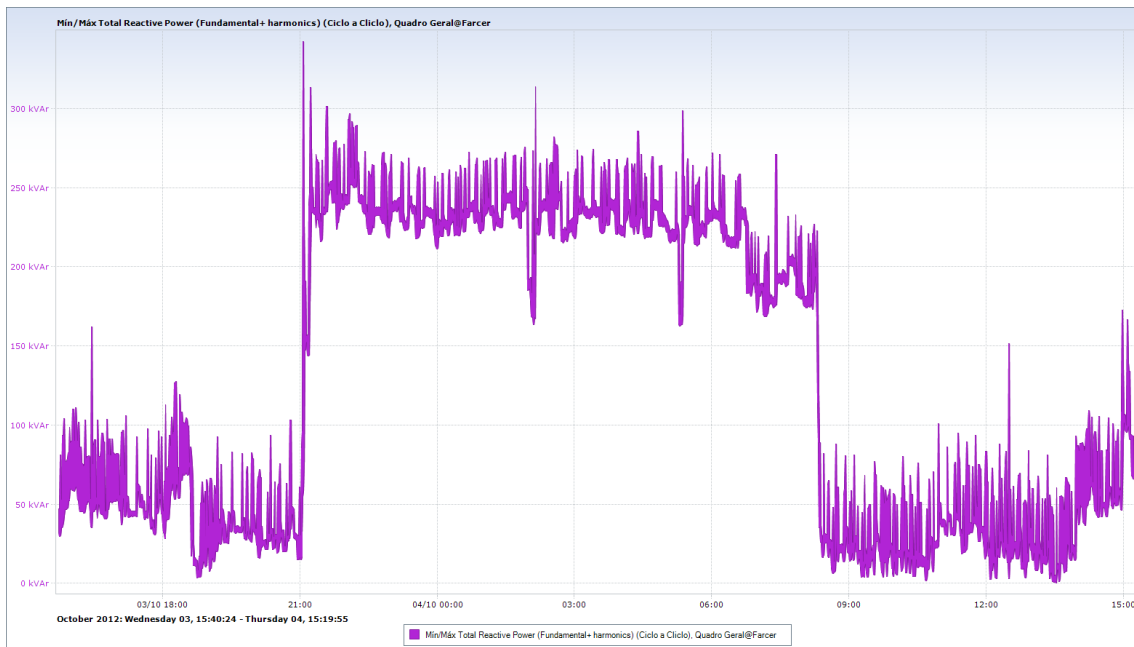


Fig. 5.2 - Consumo de potência reativa de uma instalação durante 24 horas.

Nesta situação, a correção do fator de potência pelo método anteriormente analisado, não será adequada visto que se fosse colocado um sistema de compensação com aproximadamente de 80kVAr de potência, existiriam períodos onde haveria faturação de energia reativa. Qualquer período de maior solicitação da produção, em que houvesse mais horas de produção durante o dia, daria origem a uma quantidade apreciável de energia reativa consumida a ser faturada. Nestas circunstâncias, o fator de potência deixaria de ser igual 0,6 para se tornar igual a 0,76, o que como sabemos é bastante mau. Devido a estes problemas, não é recomendável projetar um sistema de correção do fator de potência com base num fator de potência alvo diferente de 1,00, visto que já existem vários fatores de risco de pagamento de energia reativa mesmo compensando a totalidade da energia visível na fatura.

## 5.2 - Método simplificado através de fatura

Este método baseia-se no anterior, mas é mais simples e abrangente em termos de situações. Consiste igualmente no cálculo da potência reativa média e acrescenta algumas considerações de forma a obter uma margem para compensar a possibilidade de períodos em que o consumo de potência reativa é significativamente superior a aquele que é obtido pela média.

Eletricidade	Data inicial	Data final	Qtd.	Preço(€)	Valor(€)
En. Ativa vazio normal (kWh)	2012-10-13	2012-11-12	11246	0,0613	689,38
En. Ativa super vazio (kWh)	2012-10-13	2012-11-12	7454	0,0577	430,10
En. Ativa ponta (kWh)	2012-10-13	2012-11-12	8932	0,1278	1.141,51
En. Ativa cheias (kWh)	2012-10-13	2012-11-12	23663	0,0970	2.295,31
Escalão 1 de En.Reat.cons.FV (kvarh)	2012-10-13	2012-11-12	3259	0,0075	24,44
Escalão 2 de En.Reat.cons.FV (kvarh)	2012-10-13	2012-11-12	3259	0,0226	73,65
Escalão 3 de En.Reat.cons.FV (kvarh)	2012-10-13	2012-11-12	4317	0,0678	292,69
En. Reativa fornecida vazio (kvarh)	2012-10-13	2012-11-12	0	0,0169	0,00

Fig. 5.3 - Exemplo de fatura de uma unidade de corte de granito.

Deve-se proceder à soma das 3 parcelas referentes à energia reativa consumida e somar 30% da energia ativa consumida durante as horas de ponta e a de cheia, de modo a obtermos a parcela de energia reativa não faturada. Depois é dividida a totalidade da energia pelo número de horas fora de vazio, existentes por dia a multiplicar pelo número de dias úteis. Como a grande maioria das instalações não tem atividade relevante durante o fim-de-semana (exceção feita a hotéis, padarias, etc.), considera-se a energia consumida nesses dias como diluída nos dias úteis. Essa pequena quantidade de energia acaba por representar uma ligeira margem na potência média calculada. Obviamente que se a instalação tiver atividade relevante ao fim de semana, todos os períodos horários são considerados.

São utilizadas as seguintes expressões para o cálculo do consumo da potência reativa média nas instalações:

### 5.2.1 - Instalações BTE

Apenas dias úteis

$$Q_{med} = \frac{Escalão1_{Re.con.FV} + Escalão2_{Re.con.FV} + Escalão3_{Re.con.FV} + 0,3(E_{At.P} + E_{At.C})}{14 \times 22} \quad (5.9)$$

Dias úteis e fins-de-semana

$$Q_{med} = \frac{Escalão1_{Re.con.FV} + Escalão2_{Re.con.FV} + Escalão3_{Re.con.FV} + 0,3(E_{At.P} + E_{At.C})}{14 \times 30} \quad (5.10)$$

Nas expressões para instalações BTE, as horas fora de vazio totais resultam da multiplicação entre as 14 horas fora de vazio diárias e 22 dias úteis ou 30 dias para o caso de funcionar aos fins-de-semana.

### 5.2.2 - Instalações MT

Apenas dias úteis

$$Q_{med} = \frac{Escalão1_{Re.con.FV} + Escalão2_{Re.con.FV} + Escalão3_{Re.con.FV} + 0,3(E_{At.P} + E_{At.C})}{17 \times 22} \quad (5.11)$$

Dias úteis e fins-de-semana

$$Q_{med} = \frac{Escalão1_{Re.con.FV} + Escalão2_{Re.con.FV} + Escalão3_{Re.con.FV} + 0,3(E_{At.P} + E_{At.C})}{17 \times 22 + 7 \times 4} \quad (5.12)$$

Nas expressões para instalações MT que apenas operam durante os dias úteis, o número de horas fora de vazio resulta da multiplicação entre as 17 horas fora de vazio diárias e os 22 dias úteis. Nas instalações MT que operam aos fins-de-semana, para além das horas fora de vazio dos dias úteis, é necessário considerar as 7 horas fora de vazio existentes em cada Sábado a multiplicar pelos 4 Sábados existente por mês.

**Nota:** Se na instalação existirem períodos em que o consumo energético for muito superior à média (Ex: motor de 500kW numa instalação que em média consome 100kW), a potência reativa média calculada deve ser multiplicada por um valor que permita ter uma noção embora que grosseira da potência máxima. Por exemplo se o elemento de maior potência só operar 30 min por hora, deve-se multiplicar por 2, se operar por 15 min por hora, deve-se multiplicar por 4, etc. Obviamente se for uma situação em que o funcionamento do elemento de maior potência for manifestamente curto, o interesse por um sistema dimensionado para compensar a potência desse elemento será praticamente nulo. Nestas circunstâncias a influência do elemento de maior potência pode ser desprezada.

Em situações em que são efetuados pedidos de dimensionamento de um sistema de correção do fator de potência e o local de consumo fica a uma grande distância e sendo as potências médias em jogo inferiores a 80kVAr, este método é bastante válido. Mesmo tendo consciência da mais-valia em efetuar medições de energia no local, uma deslocação propositada para este efeito em que fosse dimensionado um sistema de baixa potência, torna o custo do estudo muito elevado face ao valor gerado pela produção e instalação do sistema. Assumindo que pode ser necessária alguma alteração em termos de potência máxima do sistema, esta situação é raríssima e dificilmente origina aumentos de custo superiores a 200€. Se for necessário o aumento de potência de um sistema de maiores dimensões, as diferenças de custo entre sistemas de maior potência já podem atingir alguns milhares de euros. Em conclusão este método é o melhor para dimensionar soluções de correção do fator de potência para situações que envolvem potência mais baixas e que a distância para o local de medição seja considerável. Nestas situações, o método simplificado através de fatura tem-se revelado eficaz.

### 5.3 - Medições

Este método é de longe por razões óbvias, o melhor para determinar as características do equipamento a instalar. Só assim temos uma visão clara do comportamento da carga em termos de consumos, qualidade de energia existente, harmónicos predominantes e sua severidade, nível de tensão do local, escolha da resolução correta para garantir a correta compensação de energia reativa durante toda a duração do processo industrial.

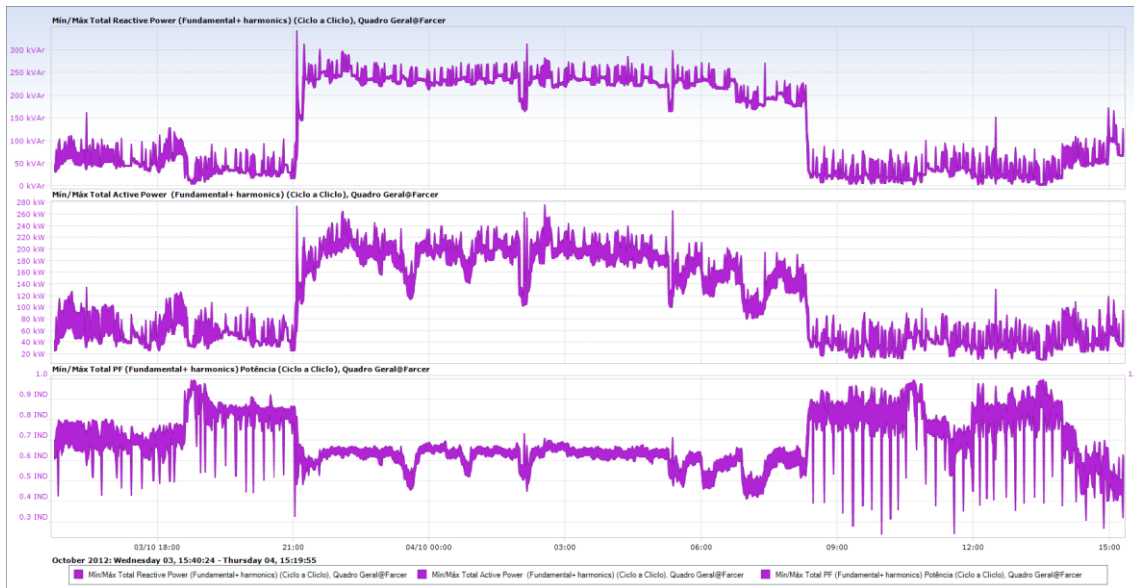


Fig. 5.4 - Gráficos de potência ativa, reativa e fator de potência.

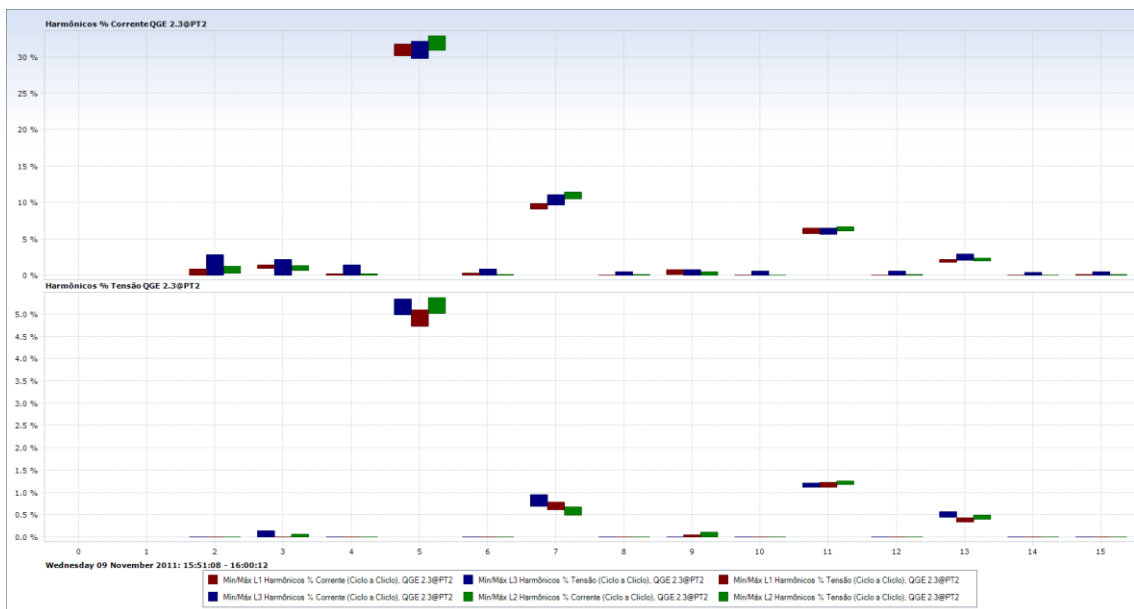
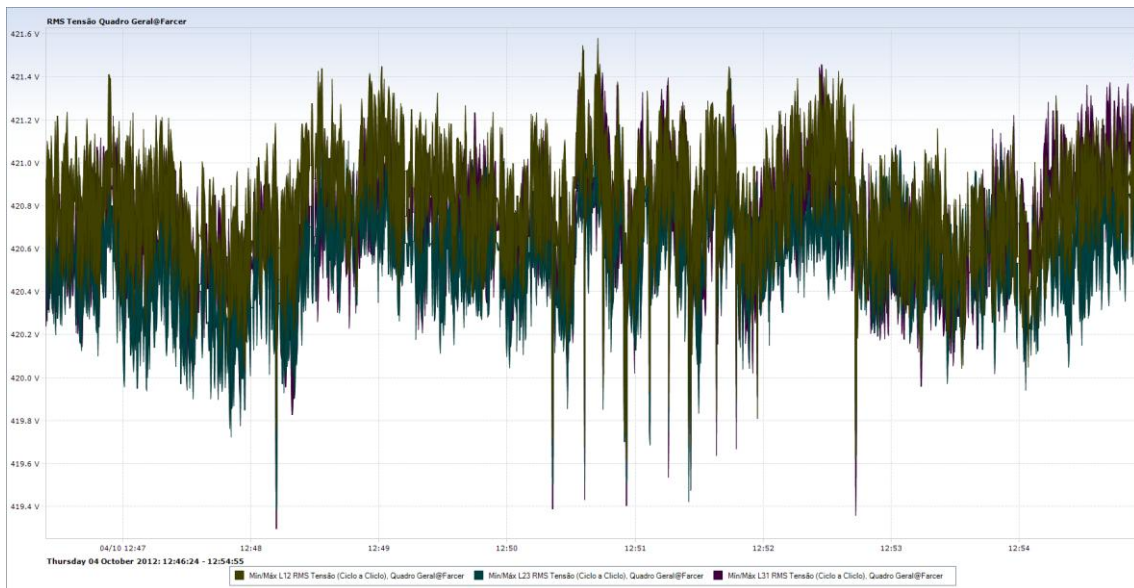


Fig. 5.5 - Espectro de harmônicos.

Sem esta análise corre-se o risco de utilizar uma resolução errada por existirem diversos períodos em que as necessidades de consumo de potência reativa são significativamente inferiores à potência do menor grupo. Se a tensão for elevada os condensadores podem ter um desgaste prematura caso essa situação não seja resolvida. No caso de sistemas com filtragem de harmônicos, os filtros empregues podem não se adequar aos harmônicos dominantes criando situações de ressonância indesejadas.

Outra grande vantagem de realizar medições é o facto de revelar situações suscetíveis de causar problemas no futuro. Por exemplo, no caso da Fig. 5.6, temos uma situação em que a tensão composta assumia valores acima dos 420V com um fator de potência próximo de 0,6. Obviamente que a instalação de um sistema de correção do fator de potência elevaria a tensão para valores superiores a 430V que por vezes poderiam atingir os 440V. Originalmente este valor já era elevado por opção do cliente devido ao fato de ser necessário alimentar os

equipamentos existente num pavilhão a cerca de 200m do QGBT. Os valores de tensão atrás referidos provocam desgaste prematuro em condensadores de 450V. Para contornar o problema será necessário proceder ao ajuste do *tap changer* de modo a baixar o valor da tensão. Desta forma podemos manter os 420V ao mesmo tempo que garantimos um fator de potência corrigido. Sem o recurso a medições, passados uns meses após a instalação, o cliente poderia ter necessidade de substituição de condensadores sujeitos a desgaste prematuro sem motivo aparente. As medições evidenciaram que o valor da tensão poderia representar um problema, necessitando de resolução antes de vir a causar problemas.



**Fig. 5.6 - Valores de tensão composta durante todo o período de medições.**



## 6. Análise de Aplicações Diversas para Sistemas de Compensação de Potência Reativa e Formas Alternativas de Correção do Fator de Potência.

Este capítulo pretende descrever, para além da simples compensação, algumas situações que um sistema de compensação de potência reativa pode resolver sem qualquer relação com a correção do fator de potência. Também serão apresentadas situações em que existe consumo ou fornecimento de potência reativa sem que seja necessário instalar um sistema de correção do fator de potência. A maioria dos elementos utilizados nestes exemplos, nomeadamente tabelas e gráficos, resultam de medições efetuadas pelo autor deste trabalho.

### 6.1 - Construção de um Túnel

Este exemplo descreve a influência de um sistema de compensação de potência reativa na construção de um túnel com 850m profundidade à data do teste no País Basco. Este trabalho foi efetuado no âmbito da empresa onde desempenhei funções.

Como é sabido existem perdas consideráveis quando se opera a distâncias longas do transformador para níveis de tensão BT. O local de maior consumo energético é na zona de perfuração que inevitavelmente é o ponto mais distante da entrada, onde está situado o ponto de fornecimento de energia.

Existe a possibilidade de colocar autotransformadores em série de modo a elevar a tensão ao longo do túnel à medida que se avança na escavação. Contudo, a escavação de um túnel constitui um ambiente hostil para os autotransformadores. Como possuem elementos eletromecânicos, a elevada quantidade de pó suspenso e os sólidos projetados no momento das explosões, infiltra-se nos contactos móveis originando sobreaquecimento e danos nos enrolamentos. Por sua vez a introdução de transformadores em série agrava o problema, visto que os transformadores consomem energia reativa contribuindo em parte para a descida do valor da tensão.

Também seria possível efetuar o fornecimento de energia ao túnel a 1000V. No entanto esta opção implica a colocação de um transformador em cada ponto de consumo, o que se traduz num sobrecusto elevado. Continuamos a introduzir elementos indutivos que contribuem para a descida do valor da tensão.

Como solução introduziu-se um sistema de compensação de potência reativa de resposta rápida ( $\leq 20ms$ ) para injetar potência reativa na zona mais próxima do centro de consumo de modo a elevar o valor da tensão em todo o túnel.

Os valores médios obtidos encontram-se na seguinte tabela,

Variáveis	Sem Sistema	Com Sistema
Tensão	327 V	406 V
Corrente	392 A	308 A
Potência Ativa	188 kW	181 kW
Potência Reativa	109 kVAr	-218 kVAr

Tabela 6.1 - Valores médios obtidos, com e sem o sistema em funcionamento.

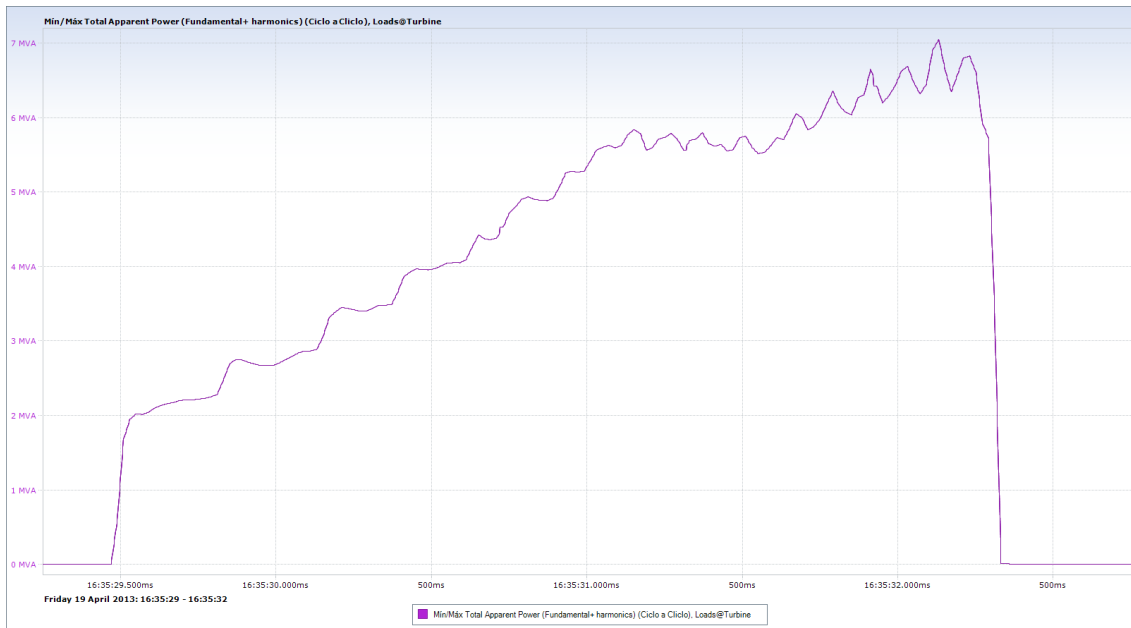
Como é visível, a tensão passou de um valor muito baixo para um valor correto e aceitável. Houve uma redução em média de 84A em cada fase contribuindo para uma redução significativa de perdas por aquecimento em 850m de cabo. Essa diferença traduz-se numa redução de 7kW em potência ativa. Como é visível o sistema injetou 317kVAr na instalação provocando um excesso de 218kVAr. Este pormenor não é problema visto que o objetivo principal era elevar a tensão para um valor próximo dos 400V, o que foi conseguido. Se a legislação espanhola for semelhante à portuguesa na isenção de faturação de energia reativa fornecida durante as horas fora de vazio, não haverá qualquer inconveniente neste pormenor. Esta solução não só permitiu repor o valor da tensão no seu nível correto, como reduzir o consumo de potência ativa e eliminar o consumo de energia reativa e o seu conseqüente pagamento.

## 6.2 - Montanha Russa

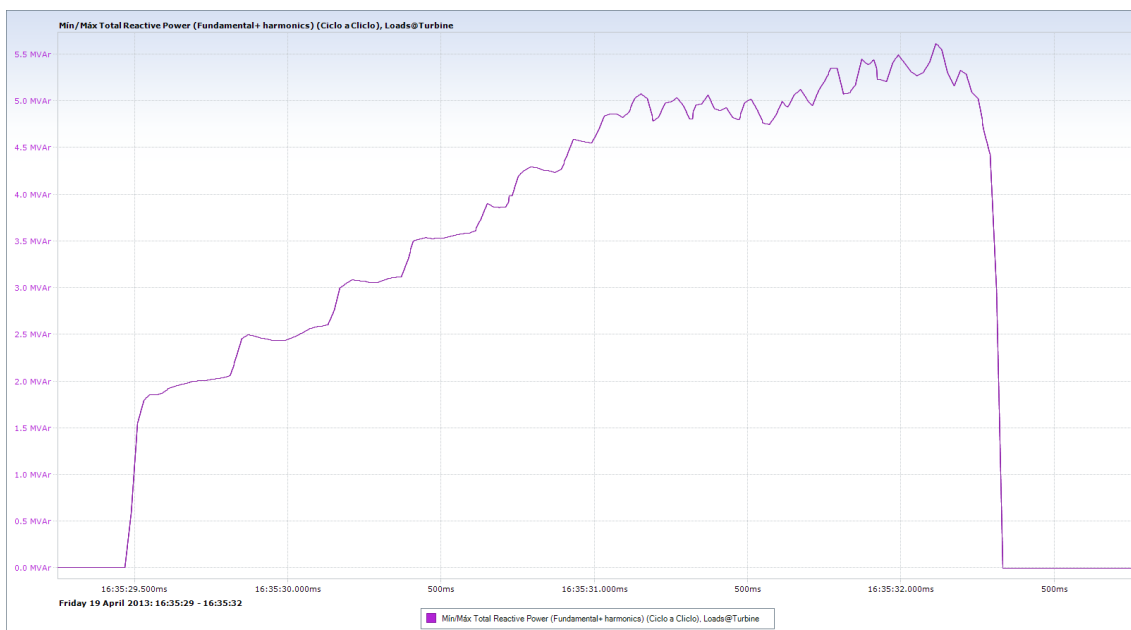
Em Wavre na Bélgica foi efetuada a instalação de um sistema de compensação de 3,6MVar, no PT de uma montanha russa. O sistema de arranque da montanha russa utilizava 20 motores lineares (Fig. 6.1) capazes de criar um campo magnético muito forte para lançar os carros em forte aceleração. A potência aparente atingia os 7MVA (Fig. 6.2) durante o arranque. Como essa potência não estava disponível na subestação foi necessário proceder à compensação de grande parte da potência reativa (Fig. 6.3). O autor desta dissertação foi o responsável pelo arranque deste sistema e pelo acompanhamento de todos os testes efetuados para verificar a estabilidade da compensação face a alterações efetuadas no lançamento da montanha russa.



Fig. 6.1 - Disposição dos motores lineares, próximo dos carris.



**Fig. 6.2 - Potência aparente da carga.**



**Fig. 6.3 - Potência reativa da carga.**

Como se pode verificar, a operação de arranque apenas dura 2,8s, deixando de existir qualquer consumo dos motores logo de seguida. Esta necessidade implica a utilização de um sistema com resposta em menos de  $\leq 20ms$ , para baixar a potência aparente o mais rápido possível.

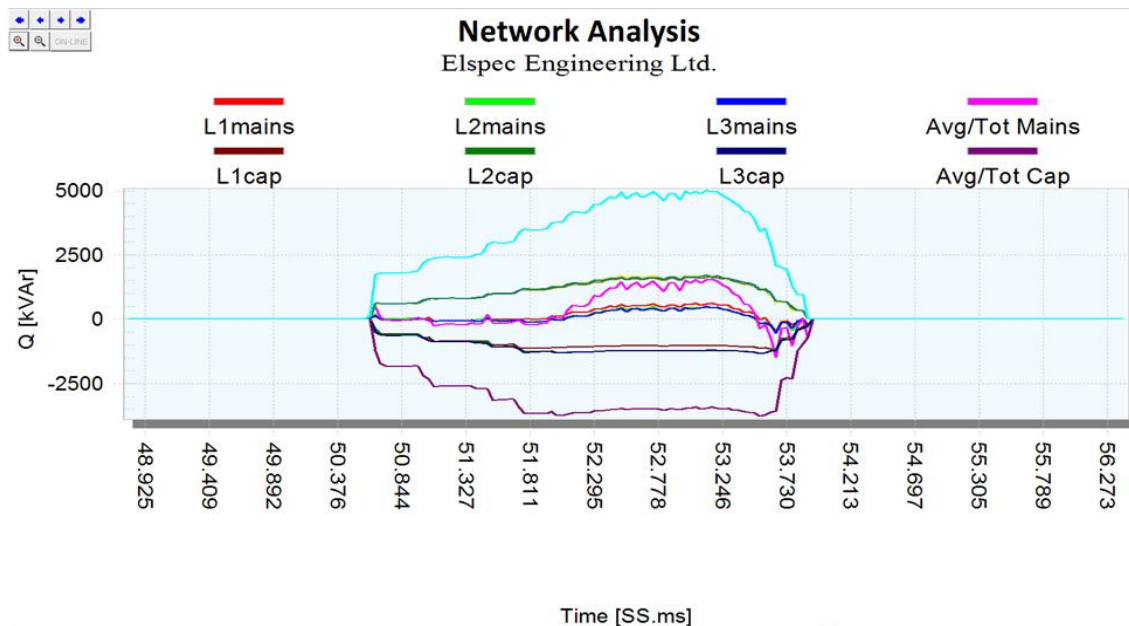


Fig. 6.4 - Potência reativa resultante face à consumida e à compensada.

- Turquesa** Potência reativa consumida
- Roxo** Potência reativa compensada
- Verde** Potência reativa por compensar

Apesar do consumo de potência reativa atingir por vezes os 6MVAR, o sistema apenas tinha 3,6MVAR porque era a potência máxima possível para um espaço de 12 metros de comprimento (Fig. 6.5).



Fig. 6.5 - Parte do sistema de 3,6kVAr.

Nesta situação, o sistema de compensação apenas foi instalado para garantir a estabilidade de funcionamento da montanha russa e evitar disparos de proteções na subestação. Devido à reduzida frequência de arranques por hora, o tempo de funcionamento do sistema de compensação pode ser contabilizado em segundos. Neste caso específico o consumo de potência reativa é irrelevante, visto que o sistema instalado apenas visa a estabilidade da rede naquele local.

### 6.3 - Sistemas Assimétricos

Os sistemas assimétricos destinam-se a aplicações onde a carga é diferente nas 3 fases, nomeadamente soldadura por pontos, que utiliza 2 fases. Nestas situações, se a compensação fosse efetuada de modo igual para as 3 fases, 2 ficariam corretamente compensadas mas outra estaria fortemente desequilibrada levando a diferenças significativas de tensão entre fases. Os sistemas assimétricos estão equipados com indutores e condensadores monofásicos, efetuando a compensação por fase de forma individual permitindo assim um maior equilíbrio entre fases. Este tipo de montagem é o mencionado no esquema do Anexo 7.

### 6.4 - Parque Eólico

Um problema associado às cavas de tensão é a paragem de geradores provocando a perda de faturação de energia durante o tempo de paragem e custos de arranque que não estavam previstos. Em diversos parques eólicos em Espanha, todos os aerogeradores possuem um sistema de resposta rápida capaz de mitigar cavas de tensão.

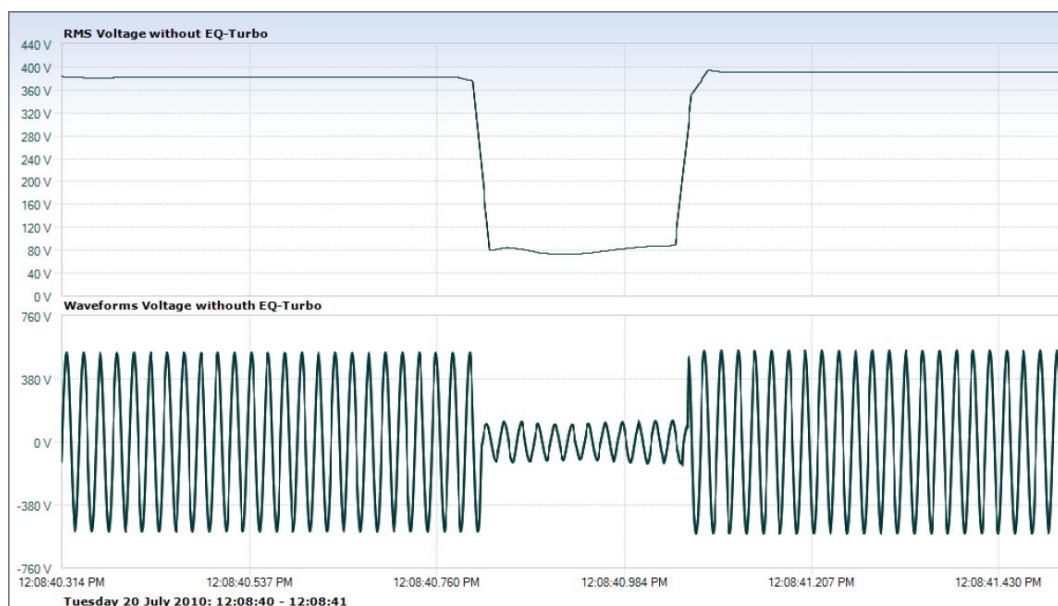


Fig. 6.6 – Comportamento de uma cava de tensão sem intervenção do sistema.

Um sistema equipado com um *firmware* adequado ao tratamento de cavas de tensão, diferente do de compensação de energia reativa que permita ignorar a necessidade da forma de onda da tensão passar por 0 para efetuar a comutação dos grupos, apresenta tempos de reação por volta dos  $\leq 10ms$ . Esta solução permite mitigar cavas de tensão até uma redução de 20% do valor nominal durante 3 segundos. Assim que seja detetada uma cava de tensão, o sistema injeta potência reativa até que a tensão volte a atingir ao seu valor nominal.



Fig. 6.7 - Influência do sistema no tratamento da cava de tensão.

## 6.5 - Parque Fotovoltaico

Um parque fotovoltaico de 15,6MW em Silves tem alguns problemas com a faturação de energia reativa indutiva e capacitiva, embora a faturação por fornecimento de energia reativa seja muito superior. Foram efetuadas medições em quatro inversores e um PS durante mais de 24 horas em cada um. Só assim se pode aferir se existe algum problema com a parametrização dos inversores, se há algum comportamento anómalo da instalação durante determinados períodos do dia e se há necessidade de instalar sistemas de correção do fator de potência.

Os sistemas de correção do fator de potência não têm de ter condensadores obrigatoriamente. Para casos de faturação de energia reativa capacitiva é possível construir sistemas apenas com indutores de dimensões superiores às dos utilizados nos sistemas convencionais. Estes elementos representam cargas indutivas que podem ser geridas exatamente da mesma forma que grupos de condensadores. No entanto, devido ao custo relativamente elevado dos sistemas de controlo e ao custo da construção de bobines de cobre de maior peso, muito raramente se justifica a implementação destes sistemas. Tipicamente os valores faturados de energia reativa capacitiva são menores do que os faturados pela energia reativa indutiva, visto que os tarifários, períodos de integração e níveis de potência são muito mais rigorosos para a energia reativa indutiva. Como tal, é mais difícil obter boas condições de retorno financeiro para estes casos.

Parâmetros	Mínimo	Máximo	Médio
L12 RMS [V]	15795,56	15910,74	15860,30
L23 RMS [V]	15764,08	15901,01	15844,54
L31 RMS [V]	15668,79	15938,89	15827,64
L1 [A]	68,68	69,91	69,24
L2 [A]	67,19	68,92	68,23
L3 [A]	69,84	71,39	70,55
P [kW]	-1822,22	-1877,92	-1852,96
Q [kVAr]	-302,17	-549,43	-425,87
F.P.	-0,99 cap	-0,96 cap	-0,97 cap

Tabela 6.2 - Valores registrados em MT durante o período de produção máxima.

Apesar da potência total do parque ser 15,6MW, em termos de pontos de entrega este encontra-se dividido em 3 setores, ou seja cada um destes é tratado como uma instalação de produção de potência inferior a 6MW. Segundo a Portaria nº596/2010, os PRE MT com uma potência igual ou inferior a 6MW durante as horas CP devem fazer acompanhar a sua produção de potência ativa de uma componente de potência reativa equivalente a  $tg(\varphi) = 0,3$ . Considerando a tolerância de 5% para desvios a este valor e que,

$$tg(\varphi) = 0,3 \pm 5\% \Leftrightarrow -0,959 \leq \cos \varphi \leq -0,956 \text{ cap}$$

Os inversores estão programados com um fator de potência igual a -0,95. Devido ao consumo de reativa provocado pelos transformadores e pelos ventiladores, o valor médio à saída do seccionador é de -0,97. Uma parametrização do fator de potência dos inversores para -0,94 aproxima o fator de potência do pretendido. Contudo a faturação revela que existe energia reativa consumida o que não é visível em produção contínua.

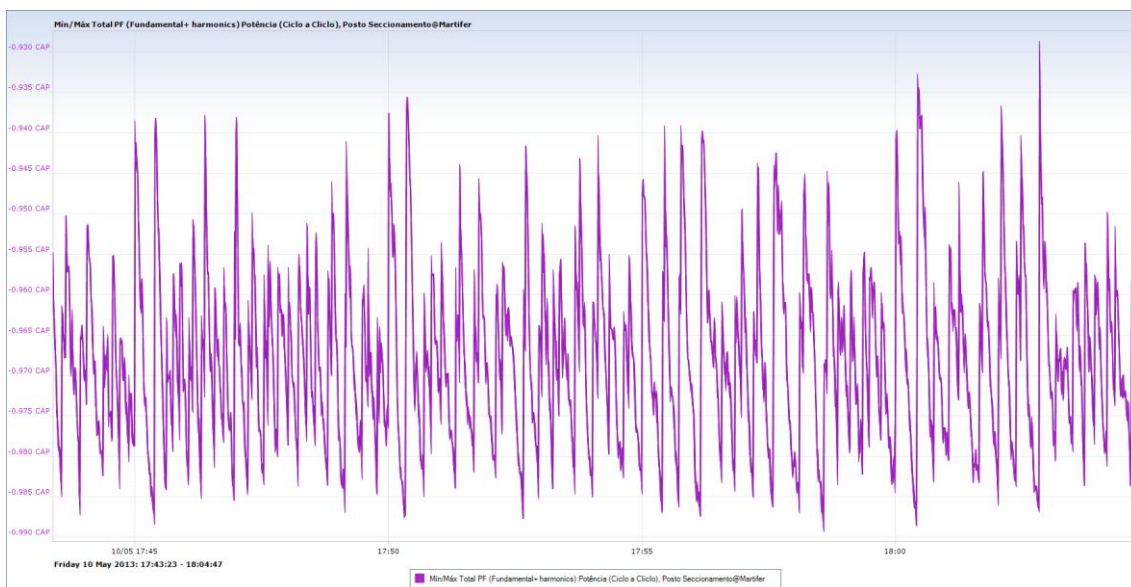
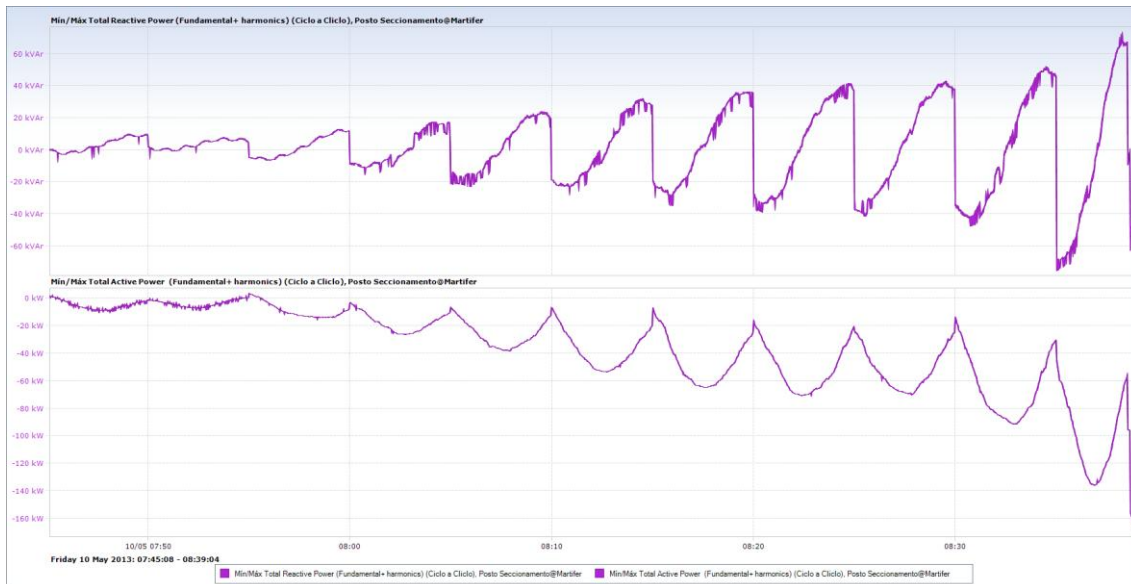


Fig. 6.8 - Comportamento do fator de potência durante o período de produção.

Ao observar os períodos de arranque dos inversores, verifica-se que existe uma variação grosseira de energia reativa, quando ainda estamos perante valores muito baixos de potência ativa (cerca de 30kW). O inversor só corrige o valor do fator de potência a cada 5 minutos, dando origem a degraus de 120kVAR que deveriam ser mais suaves. Esta lentidão no tempo de reação dos inversores provoca uma descida da potência em 50% do tempo onde ocorre consumo de potência reativa em vez de fornecimento. Desta forma, a tensão à saída dos inversores baixa, prejudicando o valor de potência ativa fornecido.



**Fig. 6.9 - Comportamento das potências no período de arranque.**

Conclui-se que neste caso, não se justifica a instalação de um sistema de correção do fator de potência, tanto indutivo como capacitivo. As correções necessárias podem ser feitas unicamente através da parametrização do *software*.

## 6.6 - Iluminação

Estas medições foram efetuadas pelo autor desta dissertação devido ao pedido de um cliente que queria comprovar se a redução de consumo de potência ativa ao substituir a iluminação fluorescente com balastro ferromagnético por lâmpadas fluorescentes de balastro eletrônico equivalia aos 50% de redução prometidos pelo fabricante. O valor de potência ativa medido para as lâmpadas equipadas com balastro ferromagnético foi de 2,41kW, enquanto o valor medido após a instalação das lâmpadas fluorescentes equipadas com balastro eletrônico foi de 1,48kW. Revelando uma redução de 39%. Neste caso específico, os 50% revelam-se otimistas. No entanto as medições revelaram algo interessante relativamente à potência reativa.

Este exemplo demonstra provavelmente a forma mais simples e conveniente de correção do fator de potência para edifícios de serviços, armazéns, hipermercados, etc. Como é sabido, as lâmpadas de descarga com balastro ferromagnético são cargas indutivas e possuem um mau fator de potência associado a um consumo energético algo elevado comparativamente aos produtos mais recentes que se encontram no mercado. Como podemos ver na Fig. 6.10, um conjunto de lâmpadas fluorescentes com balastro ferromagnético da parte de escritórios de uma empresa apresenta um consumo de potência reativa muito próximo dos 4kVAr. O fator de potência de 0,52 (Fig. 6.11) é péssimo e pode revelar-se um problema em termos de faturação em grandes edifícios que utilizem este tipo de iluminação.

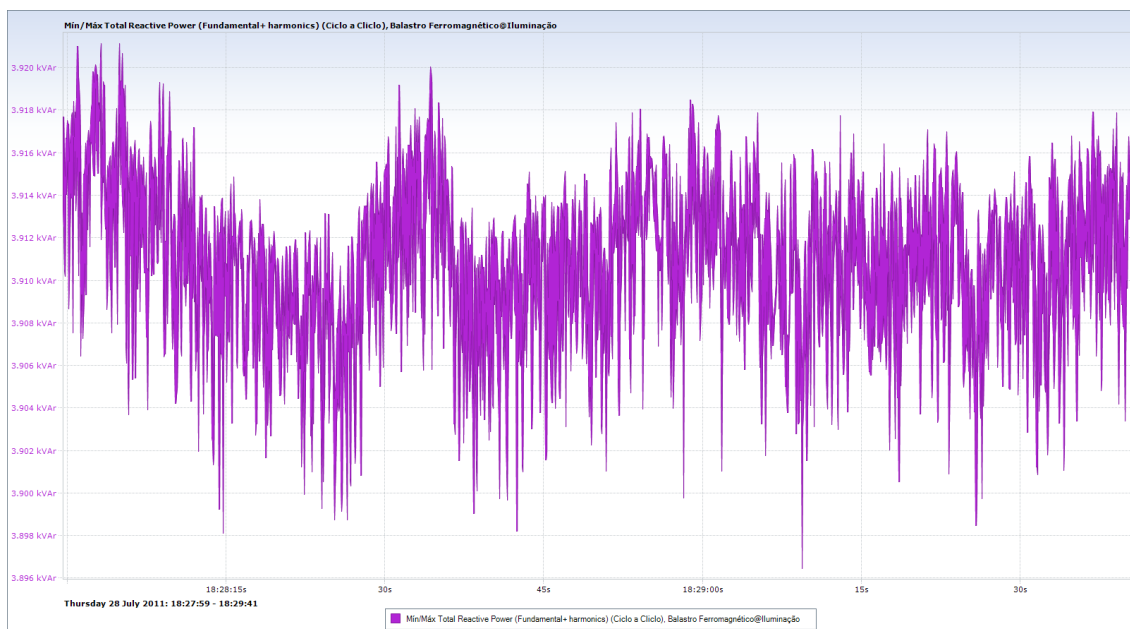
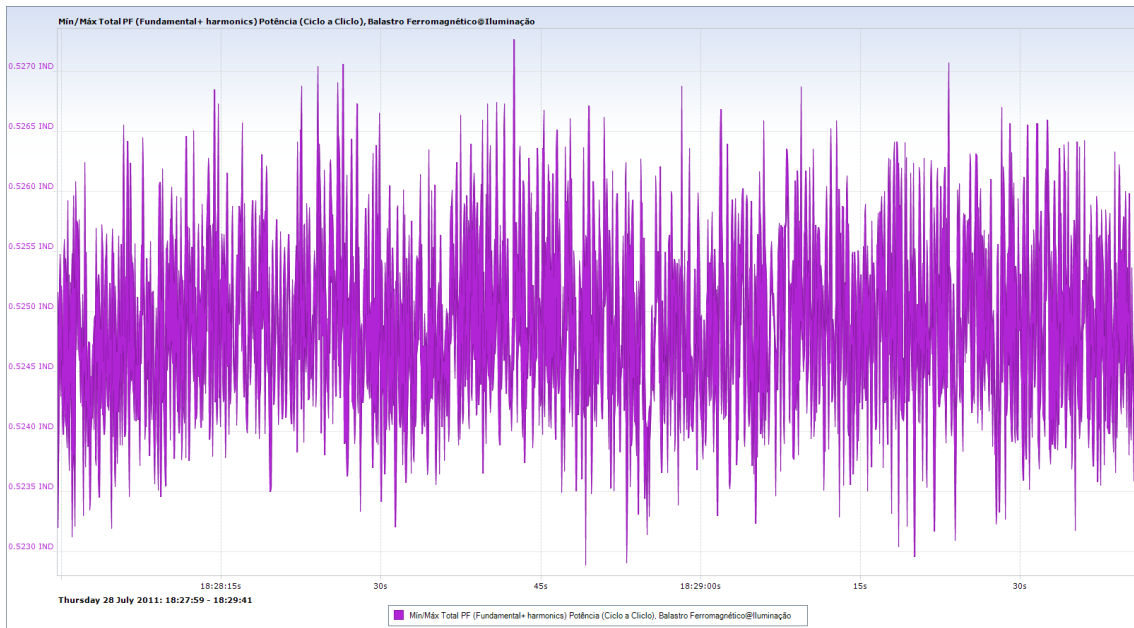
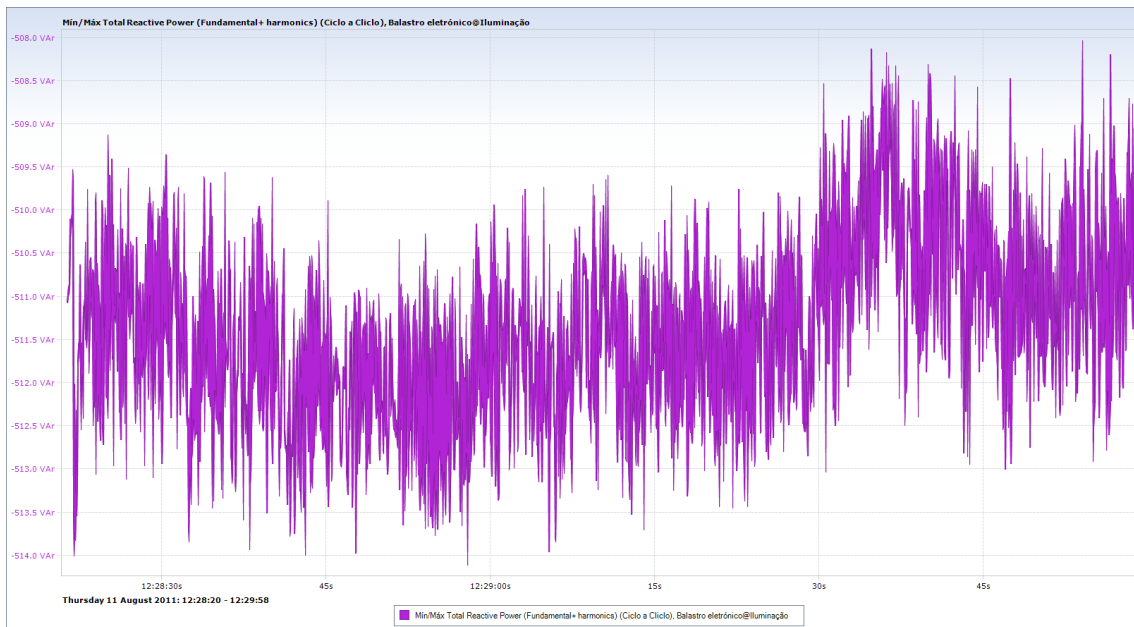


Fig. 6.10 - Potência reativa consumida por grupo de lâmpadas fluorescentes com balastro ferromagnético.

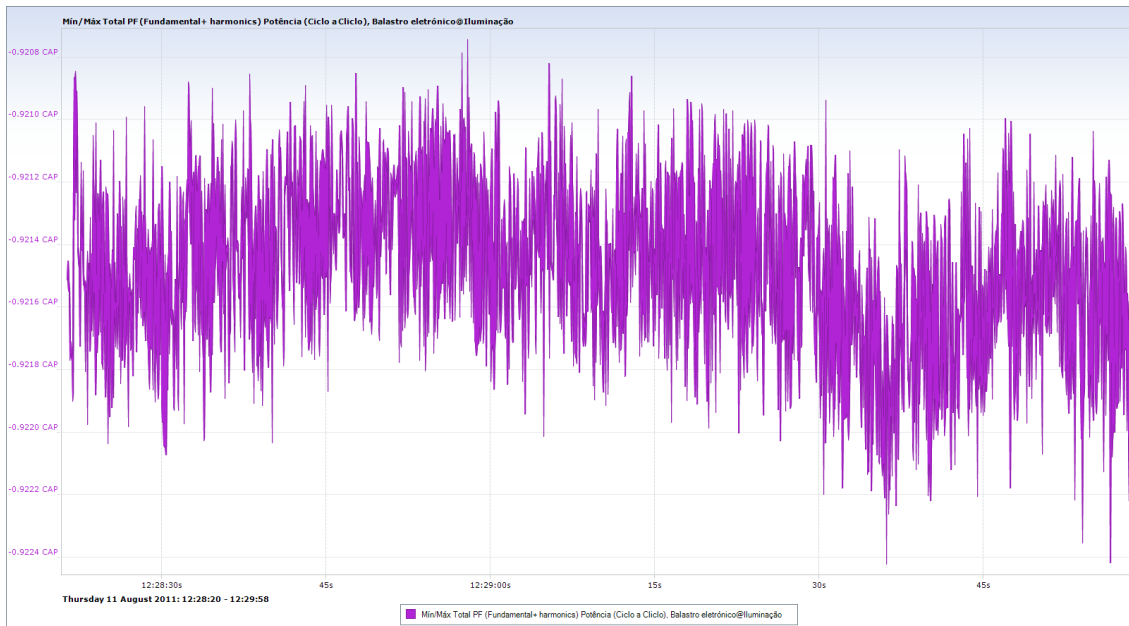


**Fig. 6.11 - Fator de potência de grupo de lâmpadas fluorescentes com balastro ferromagnético.**

As lâmpadas fluorescentes de balastro eletrônico para além da óbvia redução do consumo de potência ativa têm comportamento capacitivo ao contrário das lâmpadas fluorescente de balastro ferromagnético. Após a substituição das lâmpadas de todas as armaduras por lâmpadas de balastro eletrônico, passou a verificar um fornecimento de cerca de 510VAr (Fig. 6.12). Este tipo de iluminação tem um fator de potência capacitivo de -0,92 (Fig. 6.13).



**Fig. 6.12 - Potência reativa fornecida por grupo de lâmpadas fluorescentes de balastro eletrônico.**



**Fig. 6.13 - Fator de potência de grupo de lâmpadas fluorescentes com balastro eletrônico.**

A substituição de toda a iluminação de fluorescente de balastro ferromagnético por de balastro eletrônico pode ser uma alternativa interessante à instalação de uma bateria de condensadores em instalações cuja carga predominante seja a iluminação. Mesmo em locais onde existem outras cargas indutivas, é sempre vantajoso optar por este tipo de iluminação visto que garante uma melhoria significativa do fator de potência que muitas vezes pode ser suficiente para retirar grande parte da faturação do 3º escalão.

Em locais que tenham atividade durante o período de horas de vazio (armazéns, hipermercados durante a reposição, etc.), convém observar alguns cuidados com a instalação deste tipo de iluminação. Como estes elementos fornecem energia reativa à rede, caso não exista alguma carga indutiva para compensar, há forte possibilidade de ocorrer faturação de energia por fornecimento à rede. Em conclusão, recomenda-se fortemente a instalação deste tipo de iluminação antes de ser tomada a decisão de instalar qualquer tipo de sistema de compensação de energia reativa. A eliminação do consumo de energia reativa indutiva aliada ao fornecimento de alguma energia reativa capacitiva pode ser significativa levando a que um sistema de menor potência. Um sistema de menor potência para além de ter um menor custo permite a utilização de condutores de menor secção e permite a utilização de um disjuntor de menor calibre. Todos estes fatores tornam todos os elementos da instalação mais económicos.

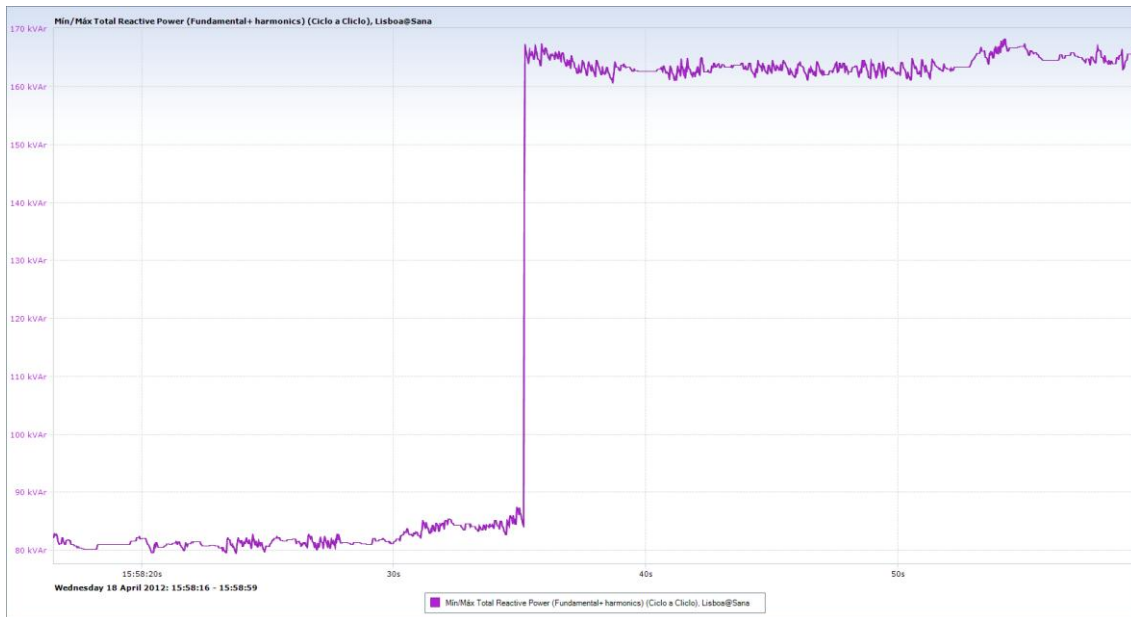


## **7. Dimensionamento, Processo de Fabrico e Instalação do Caso de Estudo.**

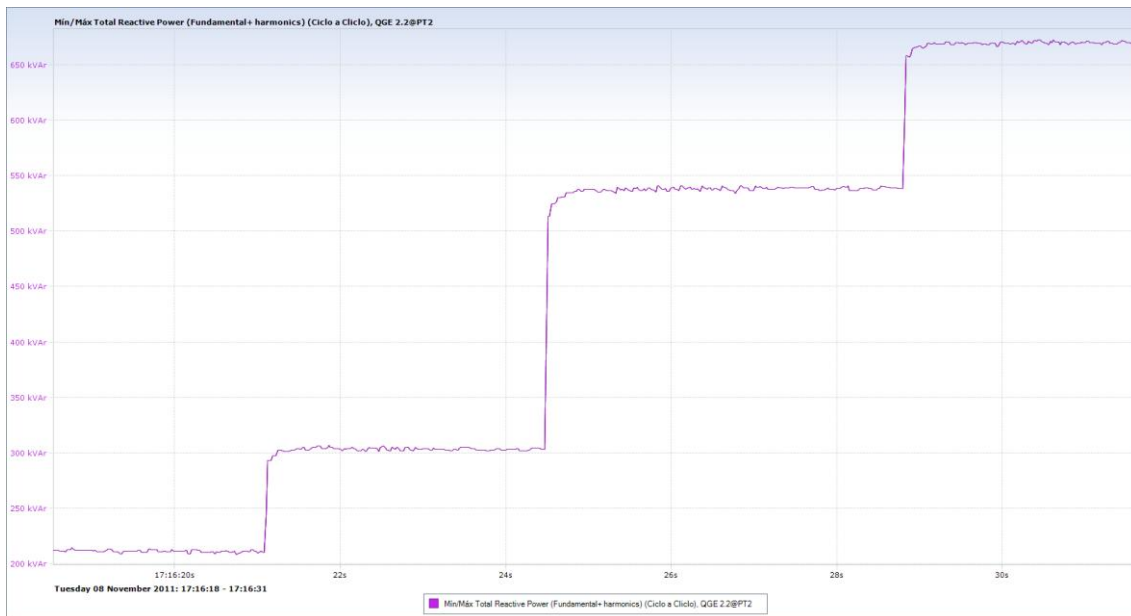
Este capítulo contém todas as etapas efetuadas para dimensionar um sistema de correção do fator de potência com filtragem passiva de harmónicos numa moagem de cereais. O sistema foi totalmente projetado e instalado pelo autor em fevereiro de 2013.

### **7.1 - Medições**

Se não forem efetuadas medições para apoiar o dimensionamento do sistema, a montagem do sistema é feita seguindo os requisitos da encomenda. Normalmente estes requisitos limitam-se à potência máxima e ao local de saída dos cabos no armário. O dimensionamento efetuado a partir de faturas apenas é utilizado para sistemas de menor potência com comutação por contactores. A melhor forma de adquirir dados sobre as necessidades de potência a compensar, regimes de funcionamento e qualidade da energia é a utilização de um analisador avançado de energia de preferência classe A. Não ser que o regime de consumo seja muito constante, é aconselhável efetuar medições de forma contínua durante uma semana. Como normalmente já existe um sistema de correção do fator de potência instalado anteriormente, a operação deste não vai permitir obter diretamente das medições os valores de potência reativa consumida a cada instante. Obviamente não se vai desligar este sistema durante todo o período de medições caso estas durem vários dias. A forma mais fácil de aferir a influência deste sistema é colocar todos os grupos em funcionamento e desligar todo o sistema instantaneamente. Esta operação permite que se visualize a potência máxima real do sistema em funcionamento como um degrau como é evidente na Fig. 7.1. Apesar de permitir uma visualização imediata, este procedimento não é aconselhável para potências superiores a 50kVAR. Esta operação pode gerar um pico de corrente que destrua os fusíveis de proteção do circuito de comando da bateria de condensadores. Como precaução relativamente a este problema, recomenda-se a retirada de funcionamento de todos os grupos de forma individual, tal como se pode verificar na Fig. 7.2. Não obstante, esta operação deve ser feita o mais rapidamente possível, para não existirem dúvidas entre os degraus provocados pela saída de funcionamento dos grupos de condensadores e eventuais variações de carga.



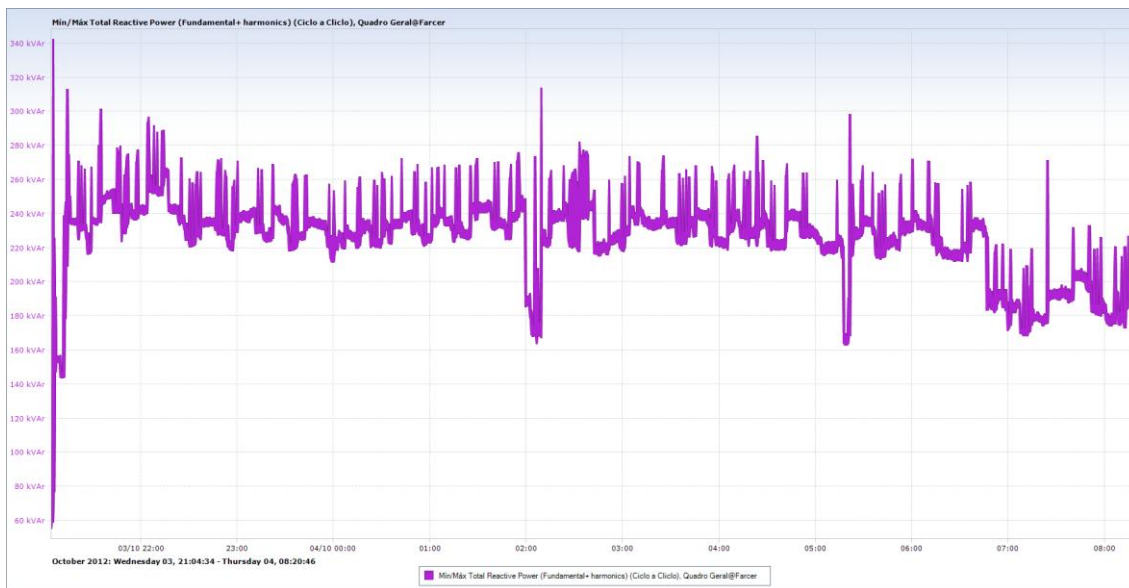
**Fig. 7.1 - Degrau provocado pela retirada instantânea de toda a potência da bateria de condensadores.**



**Fig. 7.2 - Retirada individual de cada um dos grupos da bateria de condensadores.**

## 7.2 - Potência e Resolução

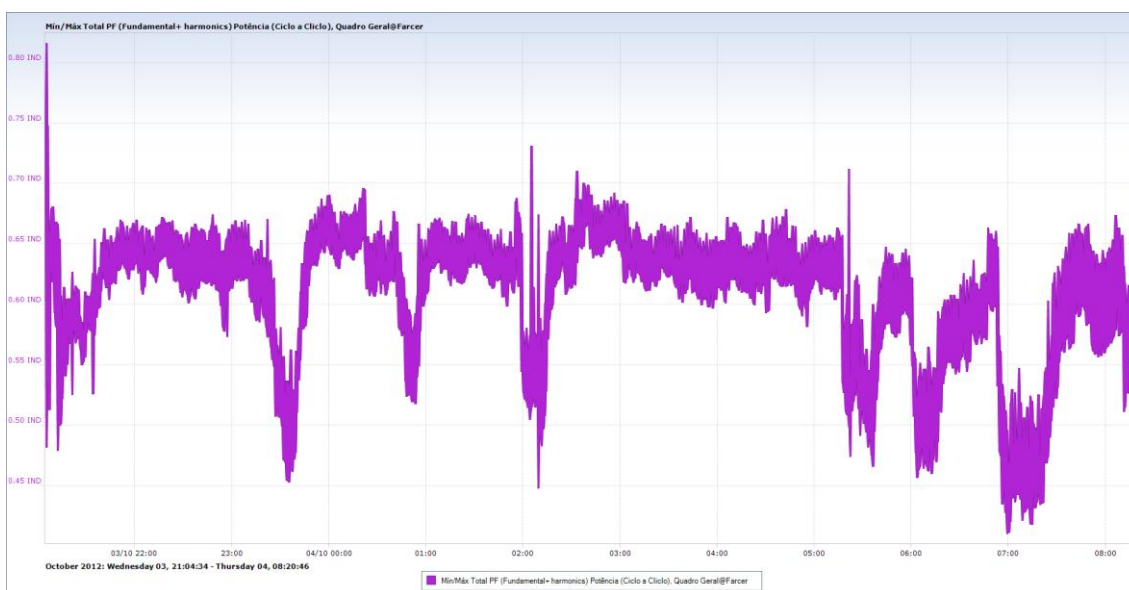
A potência máxima do sistema deve ter em consideração a potência máxima medida durante alguns dias. Terá de ser levado em conta se existem planos de aumento da instalação, novas máquinas, alterações, etc. Posto isto, deve ser adicionada uma margem de potência no sistema, caso seja possível, para compensar os eventuais aumentos de carga. A resolução do sistema deve ser menor ou igual à menor potência registada de forma contínua. O exemplo utilizado para construção de um sistema de correção do fator de potência com filtragem passiva de harmónicos será o de uma instalação de moagem de cereais presente na figura Fig. 5.2. Sabendo que não existem desequilíbrios significativos entre fases visto que a esmagadora maioria das cargas é trifásica, à primeira vista um sistema simétrico (Anexo 6) de 250kVAr de potência é o mais indicado para esta situação (Fig. 7.3).



**Fig. 7.3 - Detalhe da potência reativa no período de maior consumo.**

No entanto, deve ser analisada a possibilidade de um sistema de maior potência para eventuais aumentos de carga. Caso o aumento de potência não se traduza num aumento de custo relevante e não produza grande impacto na resolução, é uma boa prática optar por esta situação.

É bem evidente o fator de potência muito baixo durante todo o período de maior consumo (Fig. 7.4). O valor médio registado do fator de potência durante este período foi de 0,61 (Tabela 7.1). Nestas condições, existem vários problemas. O valor da tensão é afetado, implicando regulação dos *taps* do transformador. Em módulo, existe maior potência reativa do que ativa em jogo e conseqüentemente, a potência reativa é a maior responsável pelas perdas por aquecimento.



**Fig. 7.4 - Fator de potência durante o período de maior consumo.**

O problema mais relevante é a elevada faturação de energia reativa que atinge os milhares de euros visto que a maior parcela de energia reativa consumida se encontra no 3º escalão de faturação onde o valor de tabela é triplicado. A única atenuante deve-se ao facto do período de maior consumo de energia reativa ser durante as horas de vazio onde não ocorre faturação de energia reativa consumida. Caso contrário o cenário seria bem mais desfavorável em termos de faturação.

Potência	Mínimo	Médio	Máximo
Ativa	56,92 kW	173,82 kW	276,12 kW
Reativa	54,96 kVAr	223,23 kVAr	342,24 kVAr
Fator de Potência	0,41 ind	0,61 ind	0,82 ind

Tabela 7.1 - Valores de potência no período de maior consumo.

Potência	250kVAr	300kVAr
Resolução	50kVAr	60kVAr
Grupos	3	3
Sequência	1:2:2	1:2:2
Preço	8700€	9000€

Tabela 7.2 - Características e custo dos sistemas de 250 kVAr e 300kVAr.

Visto que não há aumento significativo no custo, ambos os sistemas são opções válidas para esta situação. No entanto, uma observação mais atenta das medições da Fig. 5.2, demonstra que existe um longo período em que o valor da potência reativa apresenta um valor médio próximo dos 30kVAr, como se pode ver em detalhe na Fig. 7.5. Como a resolução dos sistemas propostos é de 50kVAr e 60kVAr, o primeiro escalão não chega a entrar enquanto a potência consumida não chegar a estes valores. Perante este cenário, a bateria de condensadores não funcionaria durante todo o período de quase 12 horas em que a carga é menor. Como a potência é baixa, poderia haver a possibilidade de negligenciar estes valores caso o fator de potência fosse favorável. Como as medições indicam na Fig. 7.6, essa situação não se verifica, implicando a compensação desta potência.

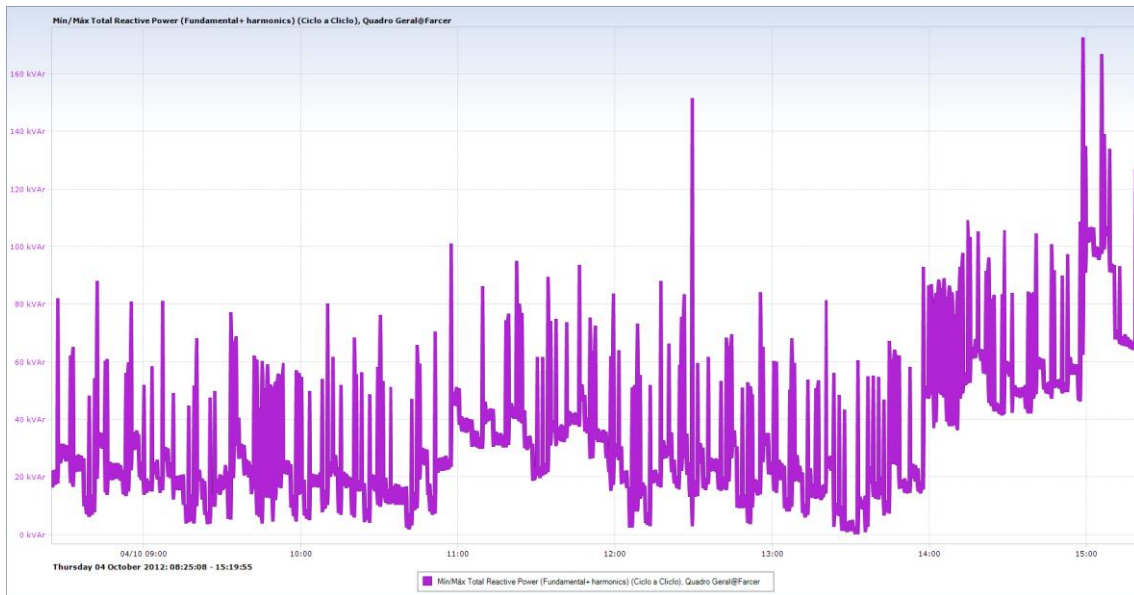


Fig. 7.5 - Potência reativa consumida no período de menor carga.

Apesar de fator de potência não ser tão baixo como no período de maior consumo, continua muito baixo. O valor médio registado durante o período de horas em que carga é menor foi de 0,76 (Tabela 7.3). Apesar do valor de potência mais baixo, a maior porção da energia reativa consumida durante as horas fora de vazio continua a estar no 3º escalão o que se traduz em valores significativos de faturação.

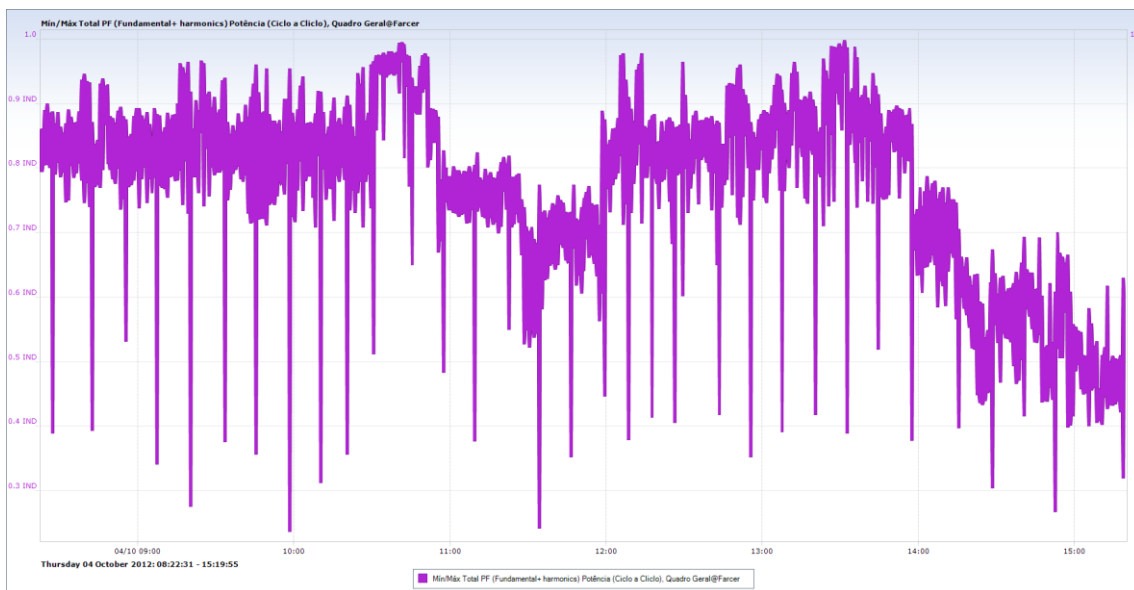


Fig. 7.6 - Fator de potência durante o período de menor consumo.

Potência	Mínimo	Médio	Máximo
Ativa	8,39 kW	34,89 kW	131,48 kW
Reativa	0,14 kVAr	29,91 kVAr	172,53 kVAr
Fator de Potência	0,24 ind	0,76 ind	0,99 ind

Tabela 7.3 - Valores de potência no período de menor consumo.

Perante esta situação, torna-se necessário adotar uma solução que permita a compensação da energia reativa consumida durante os períodos de menor carga. Essa solução passa pela utilização de sistemas de potência equivalente mas com resolução mais favorável. Esses sistemas são os que se encontram na Tabela 7.4.

Potência	275kVAr	330kVAr
Resolução	25kVAr	30kVAr
Grupos	4	4
Sequência	1:2:4:4	1:2:4:4
Preço	9160€	9820€

**Tabela 7.4 - Características e custo dos sistemas de 275kVAr e 330kVAr.**

O sistema de 275kVAr apresenta uma resolução mais favorável que o de 330kVAr mas como o valor médio registado da potência reativa consumida durante o período de horas fora de vazio é de 30kVAr torna-se mais adequada a utilização do sistema de 330kVAr. Desta forma, a potência compensada é a mais próxima possível do valor médio, sendo esta a situação ideal. Existe um aumento do custo destes sistemas face aos de 250kVAr e de 300kVAr em que o próprio sistema de 275kVAr é mais caro que o sistema de 300kVAr. Isto deve-se ao facto dos sistemas de 275kVAr e de 330kVAr terem 4 grupos de condensadores face aos 3 grupos dos sistemas de 250kVAr e de 300kVAr. Esta alteração implica a utilização de mais um indutor para o grupo extra e de um módulo de comutação por tirístores adicional visto que os módulos do tipo SWM-3A/B/C permitem um máximo de 3 grupos e 300kVAr de potência máxima. Apesar de todos os cuidados tomados na escolha do sistema, havia um problema com o local de instalação. A largura existente no local era de 820mm. Os sistemas de 4 grupos têm 1000mm de largura e ficam imediatamente eliminados da equação. Os sistemas de 3 grupos têm 800mm de largura, o que os torna os únicos de montagem possível neste local. A escolha recai inevitavelmente no sistema de 250kVAr por ser o sistema de melhor resolução dos sistemas cuja potência máxima cobre todas as necessidades de potência.



Fig. 7.7 - Limitação de espaço existente no local.

Com uma configuração *standard*, o grupo de 50kVAr não entra em funcionamento enquanto a carga não for igual ou superior ou pelo menos, não estiver muito próxima deste valor. A única possibilidade de utilizar eficazmente um sistema com estas especificações numa instalação com as características da instalação em causa consiste na alteração do *threshold* de entrada dos grupos. Ao alterar este valor de percentagem, o grupo será ligado quando for atingido o valor de potência equivalente à percentagem definida do grupo. Por exemplo, um grupo de 100kVAr com um *threshold* definido de 50% entrará em funcionamento assim que a carga atinja os 50kVAr. Esta situação deve ser evitada, pois muitas vezes haverá alguma energia reativa a ser fornecida à rede e deve ser feita uma comparação com a potência ativa para que não se fique perante um fator de potência significativamente capacitivo. Esta situação é muito comum em instalações que têm carga muito baixa durante o período de horas de vazio. Como neste caso específico o período de horas de vazio coincide com o período onde o consumo é mais elevado não haverá esse problema. Tendo em conta que a resolução é de 50kVAr, um *threshold* de 50% garante a entrada do grupo assim que a carga atinja os 25kVAr.

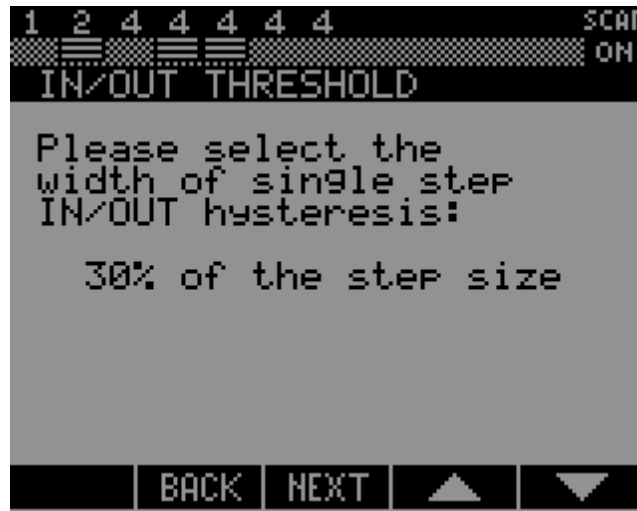


Fig. 7.8 - Regulação do *threshold* de entrada dos grupos.

### 7.3 - Instalação, Cabos e Proteção

O cabo utilizado para fazer as ligações aos barramentos é do tipo XLPE (XV ou XAV). A escolha recai sobre este tipo de isolamento devido à maior tolerância a temperaturas mais altas. Os cabos colocados em calha devem ser dispostos em triângulo, de modo a resultar num menor campo magnético à volta dos cabos. A colocação de proteções do circuito deve ser efetuada no QGBT de forma a proteger toda a extensão do cabo até aos barramentos do sistema. Erroneamente alguns clientes requerem a instalação de um disjuntor ou interruptor na entrada do sistema. O sistema de correção do fator de potência já possui fusíveis internos para a sua própria proteção, o que torna redundante a existência de outro elemento de proteção. A inserção de um disjuntor no sistema apenas protege menos de 60cm de condutores, deixando desprotegido todo o comprimento dos condutores até ao QGBT. Sempre que for necessário efetuar uma intervenção no sistema, é possível desligar o disjuntor presente no QGBT.

A corrente nominal da proteção deve ligeiramente superior à corrente nominal debitada pelo sistema e inferior à corrente máxima suportada de forma contínua pelos condutores.

$$I_b < I_n < I_z$$

$$I_b = \frac{Q}{\sqrt{3} \times U}$$

(7.1)

$$I_z = N \times I_{m\acute{a}x.sec\c{c}ao}$$

(7.2)

Em que,

$I_b$  – Corrente nominal do sistema.

$I_n$  – Corrente nominal da proteção.

$I_z$  – Corrente máxima tolerada pelos condutores de forma contínua.

$N$  – Número de condutores por fase

Os valores máximos corrente admissíveis de forma contínua para uma temperatura ambiente de 20°C, estão definidos na seguinte tabela:

Secção mm <sup>2</sup>	I A
1,5	31
2,5	41
4	53
6	66
10	87
16	113
25	144
35	174
50	206
70	254
95	301
120	343
150	387
185	434
240	501

**Tabela 7.5 - Correntes máximas admissíveis de forma contínua por condutor, a uma temperatura ambiente de 20°C para cabo XAV. [33]**

Para as características do sistema em questão temos então:

$$Q = 250 \text{ kVAr} ; U = 400 \text{ V}$$

$$I_b = \frac{Q}{\sqrt{3} \times U} = \frac{250000}{\sqrt{3} \times 400} = 360,8 \text{ A} \quad (7.3)$$

Como nesta situação específica foram registados valores de tensão contínuos de 420V, deve ser calculada a potência que a bateria de condensadores teria com este nível de tensão.

$$X_c = \frac{U^2}{Q} = \frac{400^2}{250000} = 0,64 \Omega \quad (7.4)$$

$$Q' = \frac{U'^2}{X_c} = \frac{420^2}{0,64} = 275,63 \text{ kVAr} \quad (7.5)$$

Sendo a corrente debitada pela bateria de condensadores a este nível de tensão,

$$I_b = \frac{Q'}{\sqrt{3} \times U} = \frac{275,63}{\sqrt{3} \times 420} = 378,89 \text{ A} \quad (7.6)$$

Como estes sistemas não produzem picos de corrente como os de contactores não é necessária uma margem de 40% acima da corrente máxima debitada pelo grupo de maior potência. Logo, não haverá problemas em colocar uma proteção de 400A. No entanto por requisito do cliente foi colocada uma proteção de 800A regulada a 0,5 do seu valor nominal. Para esta configuração, condutores do tipo XAV de 185mm<sup>2</sup> possibilitam correntes até 434A. Devido à opção do cliente em ter uma proteção de 800A de corrente nominal, foram colocados 2 condutores de 185mm<sup>2</sup> por fase, tolerando correntes até 868A.

$$I_b < I_n < I_z \Leftrightarrow 378,89 \text{ A} < 400 \text{ A} < 2 \times 434 \text{ A}$$



Fig. 7.9 - Ligações efetuadas com recurso a 2 condutores de 185mm<sup>2</sup> por fase.

Como,

$$I_{L1} = \frac{Q}{\sqrt{3} \times U} = \frac{50000}{\sqrt{3} \times 400} = 72,17 \text{ A} \quad (7.7)$$

$$I_{L2\&L3} = \frac{Q}{\sqrt{3} \times U} = \frac{100000}{\sqrt{3} \times 400} = 144,34 \text{ A} \quad (7.8)$$

Os calibres utilizados para os fusíveis foram 125A para a fase L1 e 250A para as fases L2 e L3.

A ligação dos TIs deve ser efetuada com recurso a condutores de 2,5mm<sup>2</sup> e existe necessidade de utilizar 3 TIs de modo a que a potência reativa empregue esteja de acordo com a potência consumida mesmo em caso de desequilíbrio de fases. Podem ser utilizados apenas 2 mas haverá menor rigor na compensação. Alguns clientes requisitaram a utilização de condutores de 6mm<sup>2</sup> para em teoria mitigar perdas mas este requisito revelou-se um erro. Esta opção resulta em contactos deficientes tanto nos bornes como nos próprios TIs provocando o sobreaquecimento da zona de contacto e por vezes arcos elétricos. Os bornes de ligação dos TIs permitem realizar um shunt entre os 2 contactos de modo a permitir o manuseamento das ligações de modo prolongado sem destruir os TIs.



Fig. 7.10 - Bornes de ligação dos 3 TIs.

## 7.4 – Escolha de Condensadores

### 7.4.1 - Dimensionamento sem influência dos indutores.

Os condensadores escolhidos para esta situação são Trifásicos modelo XD da marca Ducati. Os condensadores trifásicos XD são do tipo seco, impregnados a resina e gás. São relativamente económicos e garantem boa durabilidade para uma instalação destas características. Como a tensão nominal dos condensadores (450V) é diferente da do sistema (400V) a soma das potências nominais dos condensadores não pode ser igual à potência nominal de cada grupo. O escalonamento do sistema de 250kVAR é feito em 3 grupos, 1 de 50kVAR e 2 de 100kVAR. Sem influência dos indutores, a quantidade e as potências individuais dos condensadores instalados é feita da seguinte forma:

#### 7.4.1.1 - Grupo de 50kVAR

Como a reatância capacitiva é intrínseca aos condensadores, determina-se esta a partir da tensão nominal destes e da potência desejada.

$$X_C = \frac{U^2}{Q} = \frac{450^2}{50000} = 4,05\Omega \quad (7.9)$$

Uma vez calculado o valor da reatância capacitiva, é possível determinar a potência debitada pelos condensadores a 400V.

$$Q' = \frac{U^2}{X_C} = \frac{400^2}{4,05} = 39,51kVAR \quad (7.10)$$

Com o valor da potência dos condensadores a 400V e a 450V determina-se a percentagem da potência que os condensadores debitam a 400V.

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{39,51}{50} = 0,79 \quad (7.11)$$

Como se verifica, um condensador cuja tensão nominal seja 450V, quando alimentado a 400V apenas debita cerca de 80% da sua potência. Assim sendo 50kVAr deve corresponder a 80% da potência nominal dos condensadores a instalar.

$$Q_c = \frac{Q}{0,8} = 62,5kVAr \quad (7.12)$$

Uma das formas de obter 62,5kVAr resulta da combinação de 2 condensadores de 25kVAr com 1 de 12,5kVAr.

$$62,5kVAr \ 450V = \begin{cases} 2 \times 25kVAr \ 450V \\ 1 \times 12,5kVAr \ 450V \end{cases}$$

#### 7.4.1.2 - Grupos de 100kVAr

Como todas as características do grupo de 50kVAr se mantêm à exceção da potência podemos simplesmente duplicar a potência determinada para os condensadores do exemplo anterior, resultando 125kVAr. Para obter 125kVAr basta combinar 5 condensadores de 25kVAr.

$$125kVAr = 5 \times 25kVAr \quad (7.13)$$

### 7.4.2 - Dimensionamento com influência dos indutores

Apesar de serem elementos distintos, a influência que têm entre si implica um dimensionamento simultâneo. Devido à existência de uma tensão induzida que eleva a tensão aplicada aos terminais dos condensadores devem ser determinadas as características do indutor a implementar. Como os harmónicos dominantes (Fig. 7.11) são os de 5ª e 7ª ordem sem presença relevante do 3º harmónico, a solução passa por um filtro de 7%.



Fig. 7.11 - Espectro de harmónicos da instalação.

As especificações comuns a todos os grupos são as seguintes:

$$\begin{array}{lll}
 U_N = 450V & f = 50Hz & p\% = 7\% \\
 U_{Sist.} = 400V & f_{res.} = 189Hz &
 \end{array}$$

#### 7.4.2.1 - Grupo de 50kVAr

Sem influência da tensão induzida a potência nominal dos condensadores seria 62,5kVAr a 450V. Devido à influência existe uma variação da impedância.

$$X_C = \frac{V^2}{Q} = \frac{450^2}{62,5 \times 10^3} = 3,24\Omega \quad (7.14)$$

$$Z = X_C - p\% \times X_C = 3,24 - 0,07 \times 3,24 = 3,013\Omega \quad (7.15)$$

$$Q = \frac{V^2}{Z} = \frac{400^2}{3,01} = 53,10kVAr \quad (7.16)$$

Como o valor se afasta dos 50kVAr pretendidos é necessário reajustar o número e a potência dos condensadores a instalar.

$$60kVAr \ 450V = \begin{cases} 2 \times 25kVAr \ 450V \\ 1 \times 10kVAr \ 450V \end{cases}$$

$$X_C = \frac{V^2}{Q} = \frac{450^2}{60 \times 10^3} = 3,375\Omega \quad (7.17)$$

$$Z = X_C - p\% \times X_C = 3,375 - 0,07 \times 3,375 = 3,13875\Omega \quad (7.18)$$

$$Q = \frac{V^2}{Z} = \frac{400^2}{3,13875} = 50,975kVAr \quad (7.19)$$

#### 7.4.2.2 - Grupos de 100kVAr

Sem influência da tensão induzida, a potência nominal dos condensadores seria 125kVAr.

$$125kVAr \ 450V = 5 \times 25kVAr \ 450V \quad (7.20)$$

Com a tensão induzida:

$$X_C = \frac{V^2}{Q} = \frac{450^2}{125 \times 10^3} = 1,62\Omega \quad (7.21)$$

$$Z = X_C - p\% \times X_C = 1,62 - 0,07 \times 1,62 = 1,5066\Omega \quad (7.22)$$

$$Q = \frac{V^2}{Z} = \frac{400^2}{1,5066} = 106,199kVAr \quad (7.23)$$

Alterando a configuração para nos aproximarmos dos 100kVAr pretendidos,

$$120kVAr\ 450V = 4 \times 30kVAr\ 450V \quad (7.24)$$

Com a tensão induzida:

$$X_C = \frac{V^2}{Q} = \frac{450^2}{120 \times 10^3} = 1,6875\Omega \quad (7.25)$$

$$Z = X_C - p\% \times X_C = 1,6875 - 0,07 \times 1,6875 = 1,5694\Omega \quad (7.26)$$

$$Q = \frac{V^2}{Z} = \frac{400^2}{1,5694} = 101,950kVAr \quad (7.27)$$

## 7.5 - Dimensionamento dos Indutores

### 7.5.1 - Grupo 50kVAr

Capacidade total,

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \Leftrightarrow C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 3,375} = 943,14\mu F \quad (7.28)$$

Capacidade de cada fase,

$$C_f = \frac{C}{3} = \frac{943,14 \times 10^{-6}}{3} = 314,38\mu F \quad (7.29)$$

Como em situação de ressonância,  $X_L = X_C$ ,

$$X_L = X_C \Leftrightarrow 2\pi f L = \frac{1}{2\pi f C} \Leftrightarrow L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} = \frac{1}{(2\pi \times 189)^2 \times 943,14 \times 10^{-6}} = 0,752mH \quad (7.30)$$

Sendo a tensão induzida definida por,

$$dU = p\% \times \frac{U}{\sqrt{3}} = 0,07 \times \frac{400}{\sqrt{3}} = 16,17V \quad (7.31)$$

Desta forma, a tenção aplicada aos terminais dos condensadores é dada por,

$$Q_C = \frac{U^2}{X_C} = \frac{416,17^2}{3,375} = 51,32kVAr \quad (7.32)$$

Para que um indutor seja bem construído é necessário reunir alguns requisitos:

- A densidade de corrente deve ser o mais próxima possível de  $2A/mm^2$ .
- O campo magnético deve ser o mais próximo possível de 1T.
- As perdas no cobre e no ferro devem apresentar valores mais próximos possíveis entre si.

Determinação da secção das espiras:

Obtendo a corrente,

$$I = \frac{Q}{\sqrt{3} \times U} = \frac{51,32 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 400} = 74,07A \quad (7.33)$$

A secção necessária para uma densidade de corrente de  $2A/mm^2$  é dada por,

$$J = \frac{I}{S} \Leftrightarrow S = \frac{I}{J} = \frac{74,07}{2} = 37,04mm^2 \quad (7.34)$$

A secção mais próxima, disponível para as espiras de cobre é de  $37,5mm^2$  ( $7,5 \times 5mm$ ).  
Permitindo assim uma densidade de corrente de  $1,98A/mm^2$ .

$$J = \frac{I}{S} = \frac{74,07}{37,5} = 1,98A/mm^2 \quad (7.35)$$

Cálculo do campo magnético:

O campo magnético de uma bobine de comprimento  $l$  é dado por, [34]

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 n I l \quad (7.36)$$

Onde,

$l$  – Comprimento da bobine;

$\mu_0$  – Permeabilidade magnética.

$$|\vec{B}|l = \mu_0 n I l \Leftrightarrow |\vec{B}| = \mu_0 n I \quad (7.37)$$

E o fluxo magnético de uma espira é dado por,

$$\Phi_{espira} = |\vec{B}|A = \mu_0 n I A \quad (7.38)$$

Multiplicando por  $N$  obtém-se o fluxo magnético total,

$$\Phi_{total} = \mu_0 n I A N = (\mu_0 n N A) I \quad (7.39)$$

Como  $\Phi = LI$ , sabemos,

$$L = \mu_0 n A N \quad (7.40)$$

$$I_{induzida} = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L + X_C)^2}} = \frac{U}{X_L} = \frac{du\sqrt{2}}{2\pi f L} = \frac{du\sqrt{2}}{2\pi f \mu_0 n N A} \quad (7.41)$$

Substituindo 7.41 em 7.37,

$$B = \mu_0 n \frac{du\sqrt{2}}{2\pi f \mu_0 n N A} = \frac{du\sqrt{2}}{2\pi f N A} \quad (7.42)$$

Onde,

$du$  – Tensão induzida;  $A$  – Secção do núcleo ferromagnético;

$\sqrt{2}$  – Fator multiplicativo do valor eficaz  $\rightarrow V_{ef.} = \frac{a}{\sqrt{2}} \Leftrightarrow a = V_{ef.}\sqrt{2}$

Como um dos pressupostos implica que o campo magnético seja o mais próximo possível de 1T,

$$B = \frac{du\sqrt{2}}{2\pi fNA} = 1 \Leftrightarrow NA = \frac{du\sqrt{2}}{2\pi f} = \frac{16,17\sqrt{2}}{2\pi 50} = 72790,57 \times 10^{-6} \quad (7.43)$$

A secção do núcleo e o nº de espiras que permitem o valor mais próximo do obtido anteriormente, assim como o equilíbrio entre as perdas no ferro e as perdas no cobre, são os seguintes:

$$A = 65mm \times 65mm$$

$$N = 16$$

Resultando em,

$$NA = 65 \times 65 \times 16 \times 10^{-6} = 67600 \times 10^{-6} \quad (7.44)$$

$$B = \frac{du\sqrt{2}}{2\pi fNA} = \frac{16,17\sqrt{2}}{2\pi 50 \times 67600 \times 10^{-6}} = 1,08T \quad (7.45)$$

De acordo com as dimensões do núcleo ferromagnético e a densidade das chapas de ferro ( $7,874g/cm^3$ ) do tipo M330-50A, o peso do núcleo ferromagnético é dado pela seguinte expressão,

$$Peso = (2 \times 320 \times 65 \times 65 + 3 \times 85 \times 65 \times 65)7,874 \times 10^{-6} = 29,77kg \quad (7.46)$$

Segundo a tabela do Anexo 2, as perdas específicas das chapas de ferro do tipo M330-50A são  $1,482W/kg$  para um campo magnético de 1,08T.

As perdas no ferro resultam da multiplicação destes 2 elementos,

$$P_f = Peso \times P_{esp.} = 29,77 \times 1,482 = 44,12W \quad (7.47)$$

O comprimento do condutor de cobre que constitui as bobinas é determinado pelas dimensões do núcleo ferromagnético, cantos para introdução de elementos que permitem o isolamento entre o cobre e o ferro, espessura do cobre e pontas para permitir a aplicação dos terminais nas bobinas.

$$l = \frac{16 \times 4 \times (65 + 12 + 2 \times 5) + 400}{1000} = 5,97m \quad (7.48)$$

Sabendo que a densidade do cobre é  $8,96g/cm^3$ , o peso do cobre é determinado por,

$$Peso_c = 3 \times l \times S \times 8,96 \times 10^{-3} = 3 \times 5,97 \times 37,5 \times 8,96 \times 10^{-3} = 6,02kg \quad (7.49)$$

Sendo o valor da resistividade do cobre  $\rho = 1,72 \times 10^{-8}\Omega/m$ , a resistência de cada bobine é,

$$R = \rho \frac{l}{S} = 1,72 \times 10^{-8} \times \frac{5,97}{37,5 \times 10^{-6}} = 2,74m\Omega \quad (7.50)$$

As perdas no cobre são dadas por,

$$P_C = \frac{3\rho l^2 I}{S} = \frac{3 \times 1,72 \times 10^{-8} \times 74,07^2 \times 5,97}{37,5 \times 10^{-6}} = 44,50W \quad (7.51)$$

Resultando em perdas totais,

$$Perdas\ calculadas = P_f + P_C = 44,12 + 45,07 = 89,19W \quad (7.52)$$

Conseguindo assim valores próximos entre as perdas no ferro e as perdas no cobre.

### 7.5.2 - Grupos 100kVAr

Capacidade total,

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \Leftrightarrow C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 1,6875} = 1886,28\mu F \quad (7.53)$$

Capacidade de cada fase,

$$C_f = \frac{C}{3} = \frac{1886,28 \times 10^{-6}}{3} = 628,76\mu F \quad (7.54)$$

Como em situação de ressonância,  $X_L = X_C$ ,

$$X_L = X_C \Leftrightarrow 2\pi f L = \frac{1}{2\pi f C} \Leftrightarrow L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} = \frac{1}{(2\pi \times 189)^2 \times 1886,28 \times 10^{-6}} = 0,376mH \quad (7.55)$$

Sendo a tensão induzida definida por,

$$dU = p\% \times \frac{U}{\sqrt{3}} = 0,07 \times \frac{400}{\sqrt{3}} = 16,17V \quad (7.56)$$

Desta forma, a tensão aplicada aos terminais dos condensadores é dada por,

$$Q_C = \frac{U^2}{X_C} = \frac{416,17^2}{1,6875} = 102,64kVAr \quad (7.57)$$

Determinação da secção das espiras:

Obtendo a corrente,

$$I = \frac{Q}{\sqrt{3} \times U} = \frac{102 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 400} = 148,15A \quad (7.58)$$

A secção necessária para uma densidade de corrente de  $2A/mm^2$  é dada por,

$$J = \frac{I}{S} \Leftrightarrow S = \frac{I}{J} = \frac{147,22}{2} = 74,07mm^2 \quad (7.59)$$

A secção mais próxima, disponível para as espiras de cobre é de  $72\text{mm}^2$  ( $16 \times 4,5\text{mm}$ ). Permitindo assim uma densidade de corrente de  $2,06\text{A}/\text{mm}^2$ .

$$J = \frac{I}{S} = \frac{148,15}{72} = 2,06\text{A}/\text{mm}^2 \quad (7.60)$$

Obedecendo à restrição que implica que o campo magnético seja o mais próximo possível de 1T e utilizando a expressão 7.42,

$$B = \frac{du\sqrt{2}}{2\pi fNA} = 1 \Leftrightarrow NA = \frac{du\sqrt{2}}{2\pi f} = \frac{16,17\sqrt{2}}{2\pi 50} = 72790,57 \times 10^{-6} \quad (7.61)$$

A secção do núcleo e o nº de espiras que permitem o valor mais próximo do obtido anteriormente, assim como o equilíbrio entre as perdas no ferro e no cobre, são os seguintes:

$$A = 80\text{mm} \times 80\text{mm}$$

$$N = 11$$

Resultando em,

$$NA = 80 \times 80 \times 11 \times 10^{-6} = 70400 \times 10^{-6} \quad (7.62)$$

$$B = \frac{du\sqrt{2}}{2\pi fNA} = \frac{16,17\sqrt{2}}{2\pi 50 \times 70400 \times 10^{-6}} = 1,03\text{T} \quad (7.63)$$

De acordo com as dimensões do núcleo ferromagnético e a densidade das chapas de ferro ( $7,874\text{g}/\text{cm}^3$ ) do tipo M330-50A, o peso do núcleo ferromagnético é dado pela seguinte expressão,

$$Peso = (2 \times 350 \times 80 \times 80 + 3 \times 120 \times 80 \times 80) 7,874 \times 10^{-6} = 53,42\text{kg} \quad (7.64)$$

Segundo a tabela do Anexo 2, as perdas específicas das chapas de ferro do tipo M330-50A são  $1,362\text{W}/\text{kg}$  para um campo magnético de 1,03T.

As perdas no ferro resultam da multiplicação destes 2 elementos,

$$P_f = Peso \times P_{esp.} = 53,42 \times 1,362 = 72,76\text{W} \quad (7.65)$$

O comprimento do condutor de cobre que constitui as bobinas é determinado pelas dimensões do núcleo ferromagnético, cantos para introdução de elementos que permitem o isolamento entre o cobre e o ferro, espessura do cobre e pontas para permitir a aplicação dos terminais nas bobinas.

$$l = \frac{11 \times (4 \times 80 \times 12 + 2 \times 4,5) + 400}{1000} = 4,84\text{m} \quad (7.66)$$

Sabendo que a densidade do cobre é  $8,96\text{g}/\text{cm}^3$ , o peso do cobre é determinado por,

$$Peso_c = 3 \times l \times S \times 8,96 \times 10^{-3} = 3 \times 4,84 \times 72 \times 8,96 \times 10^{-3} = 9,37\text{kg} \quad (7.67)$$

Sendo o valor da resistividade do cobre  $\rho = 1,72 \times 10^{-8} \Omega/m$ , a resistência de cada bobine é,

$$R = \rho \frac{l}{S} = 1,72 \times 10^{-8} \times \frac{4,84}{72 \times 10^{-6}} = 1,15 m\Omega \quad (7.68)$$

As perdas no cobre são dadas por,

$$P_C = \frac{3\rho I^2 l}{S} = \frac{3 \times 1,72 \times 10^{-8} \times 148,15^2 \times 4,84}{72 \times 10^{-6}} = 76,13 W \quad (7.69)$$

Resultando em perdas totais,

$$Perdas\ calculadas = P_f + P_C = 72,76 + 76,13 = 148,89 W \quad (7.70)$$

Conseguindo assim valores próximos entre as perdas no ferro e as perdas no cobre.



Fig. 7.12 - Indutor trifásico antes da impregnação em verniz.

### 7.5.3 - Montagem e testes

Após o fabrico das bobines e do núcleo ferromagnético são inseridas placas de fibra de vidro de modo a isolar eletricamente estes elementos. São depois encaixados e aparafusados em dois perfis que permitem a montagem direta dentro do armário do sistema de compensação de energia reativa. O núcleo também é isolado dos perfis por estas placas de fibra de vidro. São colocados em cada canto dos núcleos das bobines outro tipo de perfis de fibra de vidro denominado *dogbone*, para reforçar o isolamento entre bobines e núcleos.

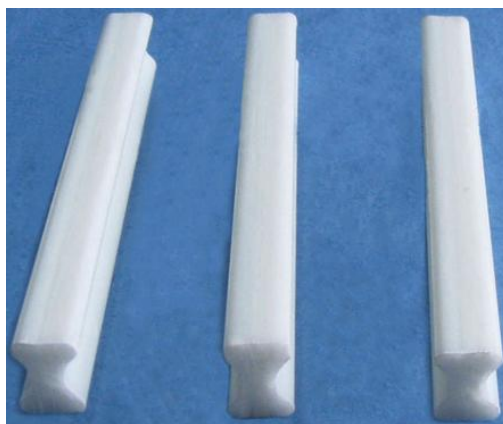


Fig. 7.13 - Perfis de fibra de vidro (Dogbone).

Após a montagem dos indutores, estes são testados à sua corrente nominal onde é verificado o seu funcionamento e as respetivas indutâncias. Se o valor das indutâncias estiver num intervalo entre +3% e -2%, os indutores são imersos em verniz sintético durante 45 minutos e depois são colocados durante 4 horas a 150°C. Finalmente são sujeitos a um teste de rigidez dielétrica a 8kV durante 1 min.



Fig. 7.14 - Aparelho de ensaios de rigidez dielétrica até 10kV. [33]

### 7.6 - Módulos de comutação

Estão disponíveis módulos de comutação para uma potência máxima de 300kVAr e de 240kVAr. Como já referido anteriormente, os módulos de comutação de 300kVAr suportam até um máximo de 3 grupos enquanto os de 240kVAr apenas suportam 1. Como o sistema em questão possui 250kVAr escalonados por 3 grupos, o módulo de comutação será do tipo SWM-3A. Estes módulos possuem internamente 6 tirístores para as fases L1 e L2 dos 3 grupos e estão protegidos por fusível e por um termostato. Existe a possibilidade de ligar estes elementos em cascata para sistemas de maiores dimensões.



Fig. 7.15 - SWM-3A.

## 7.7 - Armário, Índice de Proteção e Disposição dos Elementos

O armário utilizado tem como dimensões, 2100mm de altura, 800mm de largura e 600mm de profundidade (Anexo 5), com índice de proteção IP20 garantindo proteção ao toque acidental de componentes em tensão mas sem qualquer proteção relativamente a poeiras e líquidos.

O sistema cumpre as seguintes normas de compatibilidade eletromagnética:

- EN 50081-2;
- EN 50082-2;
- EN 55011;
- EN 61000-4-2/3/4/5;
- ENV 50204;
- ENV 50141.

A disposição dos elementos segue o exemplo do Anexo 4. Os condensadores são montados em tabuleiros colocados no fundo do armário, visíveis no Anexo 3, onde por sua vez cada um destes é ligado aos terminais dos indutores. Visto que os condensadores são o elemento mais sensível do sistema ao aumento de temperatura estes devem sempre ser colocados na posição mais baixa para que não sofram a influência do calor de outros elementos. Numa posição intermédia são colocados os indutores, onde são aparafusados diretamente nos perfis. A placa visível na zona dianteira do Anexo 3 não é necessária para este sistema em causa. Apenas existe necessidade de utilização desta placa quando são utilizados módulos de comutação do tipo SWM-1. A fase 1 e 2 dos indutores são ligadas aos módulos de comutação enquanto a fase 3 tem ligação direta dos barramentos tal como se pode verificar na Fig. 7.16. Não existe

necessidade de utilizar 3 tirístores para colocar um grupo em funcionamento devido ao facto dos condensadores estarem ligados em triângulo. Como a fase 3 fica sempre ligada a um dos terminais do condensador, basta fazer a comutação das fases 1 e 2 para completar o triângulo e haver tensão aplicada a todos os terminais do condensador. Dispensando 1 tiristor por grupo existe uma redução significativa de material e conseqüentemente de custo.

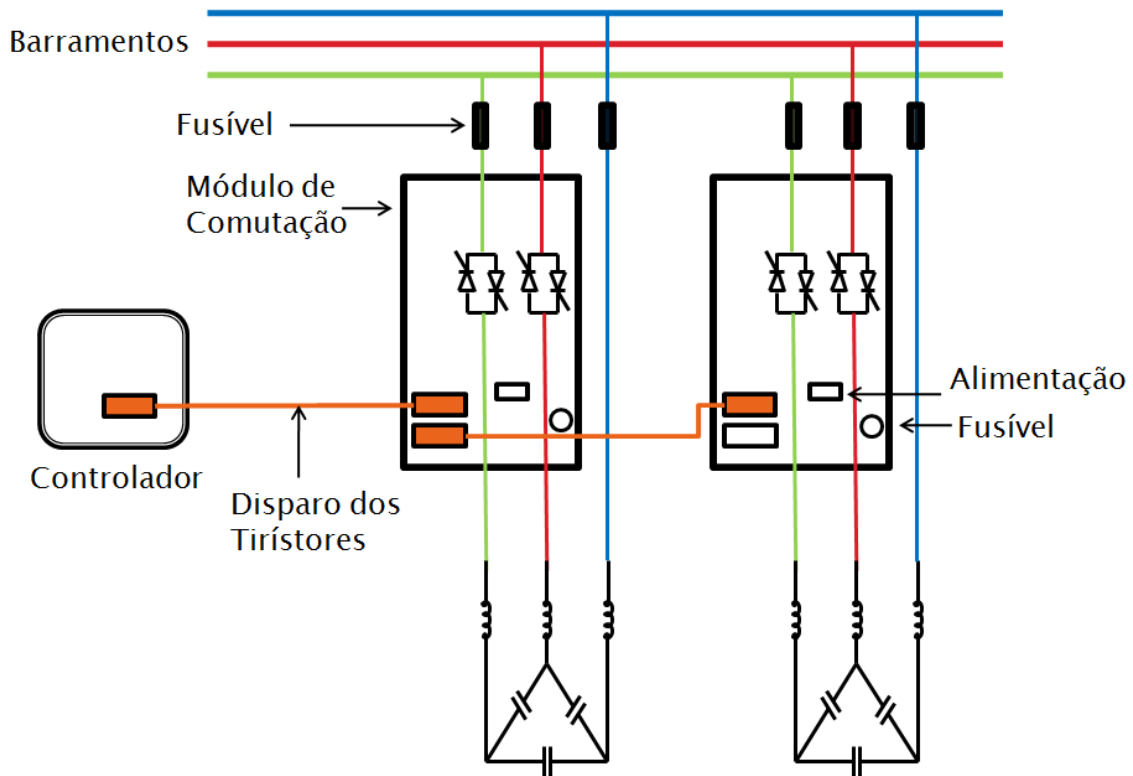


Fig. 7.16 - Esquema de ligação dos módulos de comutação aos indutores e condensadores.

## 7.8 - Controlador

O controlador deve ter características ajustadas face às necessidades da carga. Se ocorrerem variações significativas da carga com grande frequência, o sistema de correção do fator de potência deve acompanhar a carga em tempo real. Neste caso específico, não há necessidade de utilização de um sistema de compensação em tempo real ( $t \leq 20\text{ms}$ ) tendo em conta o funcionamento razoavelmente estável visível na Fig. 7.3. Pode-se assim utilizar um controlador mais económico com um tempo de resposta mais lento ( $1\text{s} \leq t \leq 4\text{s}$ ). Situações que justificam este tipo de solução consistem no funcionamento de máquinas de extrusão e de variadores de grande potência. A Fig. 7.17 apresenta as medições realizadas nos cabos de alimentação de uma extrusora instalada num local onde existiam 3 extrusoras com um comportamento semelhante. O seu funcionamento resulta em imensas variações à volta dos 100kVAR numa questão de milissegundos, justificando a utilização de um controlador de resposta em tempo real. Não obstante, se os picos de consumo não ocorrerem com muita frequência, mesmo que estes atinjam valores muito acima do valor médio da carga como se verifica na Fig. 7.18, não justificam o dimensionamento para a potência máxima e o respetivo controlador de resposta em tempo real, podendo-se utilizar um elemento de resposta mais lenta ( $1\text{s} \leq t \leq 4\text{s}$ ).

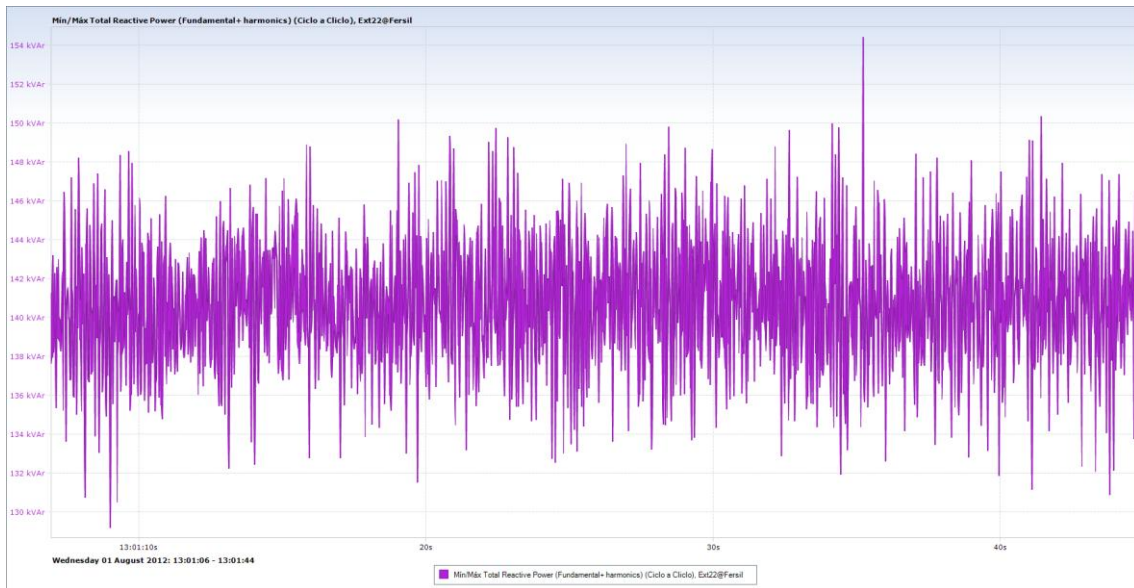


Fig. 7.17 - Variação do consumo instantâneo de uma extrusora.

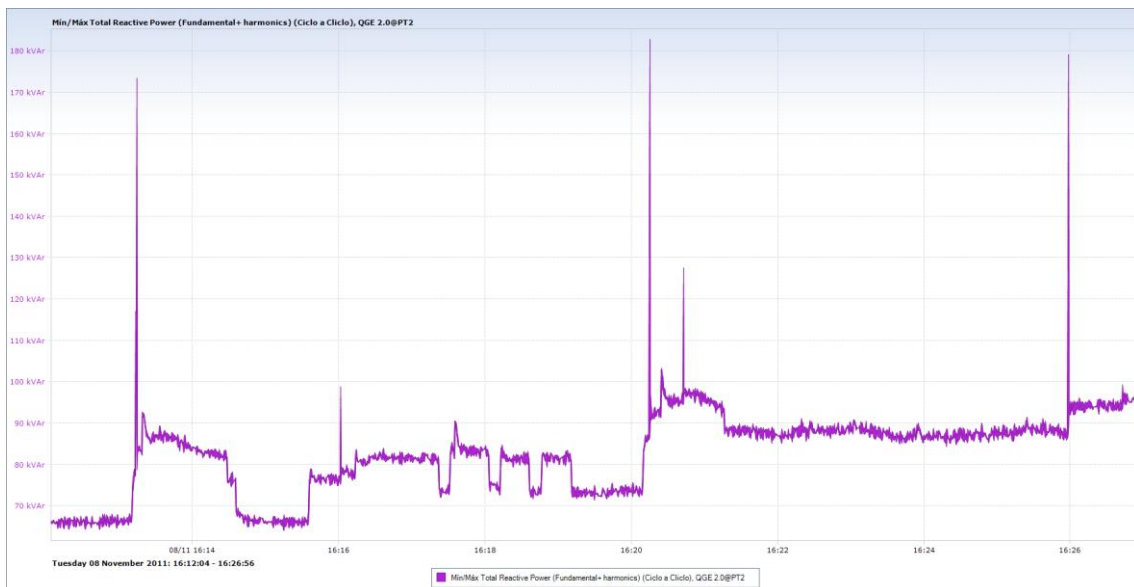


Fig. 7.18 - Picos de consumo de potência reativa na carga.

## 7.9 - Parametrização

Para obter um funcionamento correto é necessário proceder à introdução da razão de transformação dos TIs externos que neste caso é de 1000/5A. O controlador permite ainda efetuar a compensação do transformador a montante. Esta função no entanto só deve ser utilizada se a contagem for feita em MT, pois caso a contagem seja efetuada em BT, o transformador encontra-se a montante do contador, o que tornaria a compensação excessiva. Aferindo a potência do transformador instalado é possível saber se a contagem é feita em MT ou BT. A contagem é feita em BT para potências contratadas até 630kVA e em MT para potências superiores. Como o transformador existente no local é de 1000kVA, sabemos que a contagem é feita em MT. Contudo esta função não foi ativada devido ao facto do *threshold* de entrada dos grupos já estar a 50% e caso esta função fosse habilitada, poderiam ser fornecidos 40kVAr à rede em alguns períodos. Existe também a possibilidade de definir o fator de

potência alvo como valor mínimo, médio ou máximo. Neste caso, assim como na maioria das situações a opção escolhida é o valor médio. As restantes opções só devem ser utilizadas como ajustes ao funcionamento do sistema caso ocorra faturação de energia reativa após a instalação.

Existe possibilidade de ativar o *Scan Mode* que permite a partilha de tempo de funcionamento entre grupos da mesma potência, quando 1 ou mais grupos estão disponíveis. Por exemplo, se tivermos 3 grupos de 100kVAr e a carga fosse 100kVAr, não ficaria a funcionar apenas um grupo. Haveria a troca de grupo a cada 6 segundos, funcionando todos os grupos um terço do tempo que funcionaria um grupo constantemente ligado. Desta forma o desgaste é uniforme por todos os grupos permitindo o aumento da vida útil dos mesmos. Como os tempos de funcionamento de cada elemento também são reduzidos, as perdas por aquecimento também são minimizadas, assim como a possibilidade de sobreaquecimento dos elementos existente no sistema, nomeadamente condensadores, indutores e módulos de comutação. Neste caso específico apenas existem 2 grupos de potência igual, pelo que os ganhos não são tão significativos. Apesar de tudo continua a ser vantajosa a aplicação desta funcionalidade, pelo que ficou ativada.

## 7.10 - Detecção de Erros e Testes Finais

Após ser ligado pela primeira vez, o sistema mede a potência de cada 1 dos grupos e apresenta erros caso sejam detetados. É testada a ligação correta dos grupos, funcionamento dos tirístores e sincronização com a rede.

Erro	Ocorrência	Possíveis soluções
E3	Impossibilidade de ligar um grupo	Verificar fusíveis, módulo de comutação e cabo de disparo dos tirístores
E5	Comutação falhada	Substituir módulo de comutação
E6	Erro de sincronização com a rede	Filtrar harmónicos
E7	Temperatura elevada	Verificar ventoinhas e termostatos
E8	Ausência de uma das fases	Verificar fusíveis e condutores
E10	Ressonância	Substituir indutores por outros de p% diferente

**Tabela 7.6 - Lista de eventuais problemas e possíveis soluções.**

Os problemas mais comuns em operações de manutenção são os erros 3, 5 e 7. O sistema guarda um histórico de eventos de modo a existir um registo de todos os problemas permitindo que se tome conhecimento destes, independentemente de se tratar de uma falha permanente ou de uma situação transitória. Esta funcionalidade permite poupar bastante tempo em operações de manutenção.

Antes de instalar o sistema no local para o qual foi projetado, é necessário testar todo o circuito de proteção de temperatura elevada. As ventoinhas dos módulos de comutação são obstruídas, forçando o aumento de temperatura dentro do sistema para que os circuitos de proteção atuem. Aos 55°C é ativada a ventoinha do módulo de comutação. Caso sejam ultrapassados os 85°C no módulo de comutação ou os 120°C nos indutores, toda a parte de potência do sistema é desativada.

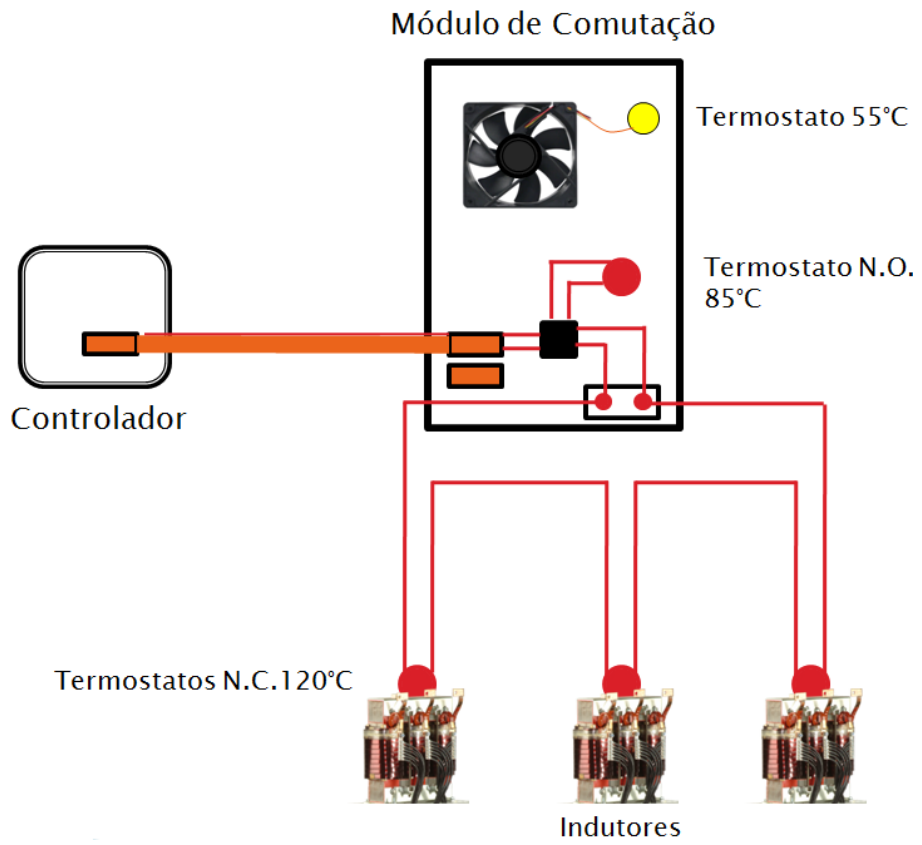


Fig. 7.19 - Circuito de proteção a temperaturas elevadas do sistema.



## 8. Conclusões

Nesta dissertação foi efetuado um levantamento de toda a legislação relevante à faturação de energia reativa para consumidores e produtores. Apesar das versões atuais destes decretos e portarias já terem alguns anos, ainda hoje há muita discussão em gabinetes de engenharia sempre que há situações um pouco mais complicadas. As regras não são propriamente confusas mas exigem uma leitura dos documentos na sua totalidade. Sem conhecimento da legislação na sua íntegra, tomam-se decisões erradas que levam a projetos que partem de pressupostos incorretos dando origem a prejuízos tanto para clientes como instaladores. Um erro comum observado foi o de se pensar que os produtores de energia de potência igual ou inferior a 6MW deviam ter uma  $\tan \varphi = 0$  em vez de  $\tan \varphi = 0,3$ . No caso dos consumidores, outro erro comum é o facto de muitos insistirem em definir nos sistemas, fatores de potência objetivo de valores inferiores a 0,98 com receio da faturação de energia reativa fornecida à rede durante as horas de vazio. A faturação de energia reativa consumida já ocorre se o fator de potência for inferior a 0,96 enquanto para ocorrer faturação de energia reativa capacitiva é necessário fornecer energia reativa para além de um fator de potência de -0,92. O período de integração para a energia reativa consumida é diário enquanto para a fornecida é mensal. Este pormenor revela que se torna mais fácil diluir situações esporádicas de fornecimento à rede. Os sistemas de compensação de energia reativa possuem algoritmos que apresentam um comportamento muito mais estável quando parametrizados para funcionar a  $FP=1$ .

Verificou-se que a realização de medições no local do caso de estudo permitiu observar vários detalhes que seriam impossíveis de prever, caso o dimensionamento apenas se baseasse em faturas e aproximações por estimativa. É de extrema importância completar pelo menos um ciclo diário de funcionamento da instalação de modo a ter informação sobre todos os momentos do diagrama de cargas. Se apenas fossem feitas medições durante o período de maior consumo, a resolução implementada poderia ser incorreta levando à faturação de energia reativa devido à carga não ser suficiente para permitir a entrada do menor escalão. Desta forma o sistema ficou dimensionado à medida com muito baixa probabilidade de ocorrência de problemas por falta de potência, resolução inadequada ou ressonância paralela. Ficou claro que o dimensionamento à medida traz grandes vantagens económicas evitando sobredimensionamentos injustificados.

Existe uma procura constante por condensadores de fabricantes diferentes para encontrar elementos mais resistentes tendo em conta o fator preço. Em trabalhos paralelos ao exemplo em estudo foram utilizados condensadores que apresentavam um aquecimento muito superior ao normal tendo-se destruído algumas unidades de forma prematura. Neste trabalho, este ponto foi levado em consideração, apenas se tendo utilizado condensadores que dão melhores garantias.

Os indutores foram dimensionados à medida para os harmónicos predominantes de acordo com as medições efetuadas. Devido ao facto dos equipamentos existentes no local serem recentes, não houve graves problemas com a distorção harmónica visto que nos últimos tempos tem havido maior consciencialização dos fabricantes relativamente a este problema.

Segundo o dimensionamento efetuado, seriam suficientes condutores de  $185\text{mm}^2$  por fase. No entanto devido a exigência do cliente foram instalados 2 condutores de  $185\text{mm}^2$  por fase. Também foi realizado um shunt entre o contacto de neutro e de terra do controlador visto que é necessário um ponto de referência para apresentar as tensões simples e o sistema apenas está ligado a 3 fases e uma linha de terra.

Ficou demonstrado que sistemas de compensação em tempo real, desde que dimensionados e parametrizados corretamente podem trazer vantagens claras relativamente à redução do consumo energético.

Foram apresentadas outras situações que os sistemas de compensação de reativa podem resolver muitos outros problemas como regular o nível de tensão e reduzir a potência aparente. Também se demonstrou que nem sempre é necessária a implementação de um sistema de compensação quando há faturação de energia reativa consumida ou fornecida, visto que por vezes basta parametrizar equipamentos com valores diferentes. Noutras situações a solução mais vantajosa passa pela substituição da iluminação visto que se trata de uma solução bem mais económica e que garante uma redução de consumo de energia ativa para além da eliminação da faturação de energia reativa.

## Referências

- [1] Hadi Saadat, *Power System Analysis, Second Edition.*: Mc Graw-Hill, 2002.
- [2] (2012, June) Smart Grid Sherpa. [Online]. <http://smartgridsherpa.com/blog/smart-grid-and-reactive-power-control-part-1-reactive-loading-current-for-power-transmission>
- [3] Barry W. Kennedy, *Power Quality Primer.*: Mc Graw-Hill, 2000.
- [4] Nicolas de Medina, Manuel Anton, and Angel Miguel, *La amenaza de los armonicos y sus soluciones.*: Paraninfo, 2000.
- [5] W. Mack Grady and Robert J. Gilleskie, "Harmonics and how they relate to power factor," in *EPRI Power Quality Issues & Opportunities Conference*, San Diego, 1993.
- [6] Fernando Maurício Dias, *Qualidade da Tensão*, 2008, Apontamentos de Qualidade de Serviço em SEE.
- [7] NP EN 50160: "Características da tensão fornecida pelas redes de distribuição pública de energia", 2011.
- [8] IEEE Std 519-1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 1992.
- [9] ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, Despacho nº18413-A/2001, 2001.
- [10] ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, Proposta de Alteração das Regras de Facturação de Energia Reactiva, 2009.
- [11] ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, Despacho nº7253/2010, 2010.
- [12] ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, Despacho nº12605, 2010.
- [13] Ministério da Economia da Inovação e do Desenvolvimento, Portaria 596/2010, 2010.
- [14] ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, Tarifas Transitórias de Venda a Clientes Finais em Portugal Continental em 2013, 2013.
- [15] ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos. [Online]. [www.erse.pt](http://www.erse.pt)
- [16] EPCOS. [Online]. [www.epcos.com](http://www.epcos.com)
- [17] Franke GMKP Energy. [Online]. [www.frankeenergy.com](http://www.frankeenergy.com)
- [18] Electronicon Kondensatoren GmbH. [Online]. [www.electronicon.com](http://www.electronicon.com)
- [19] Frako. [Online]. [www.frako.com](http://www.frako.com)

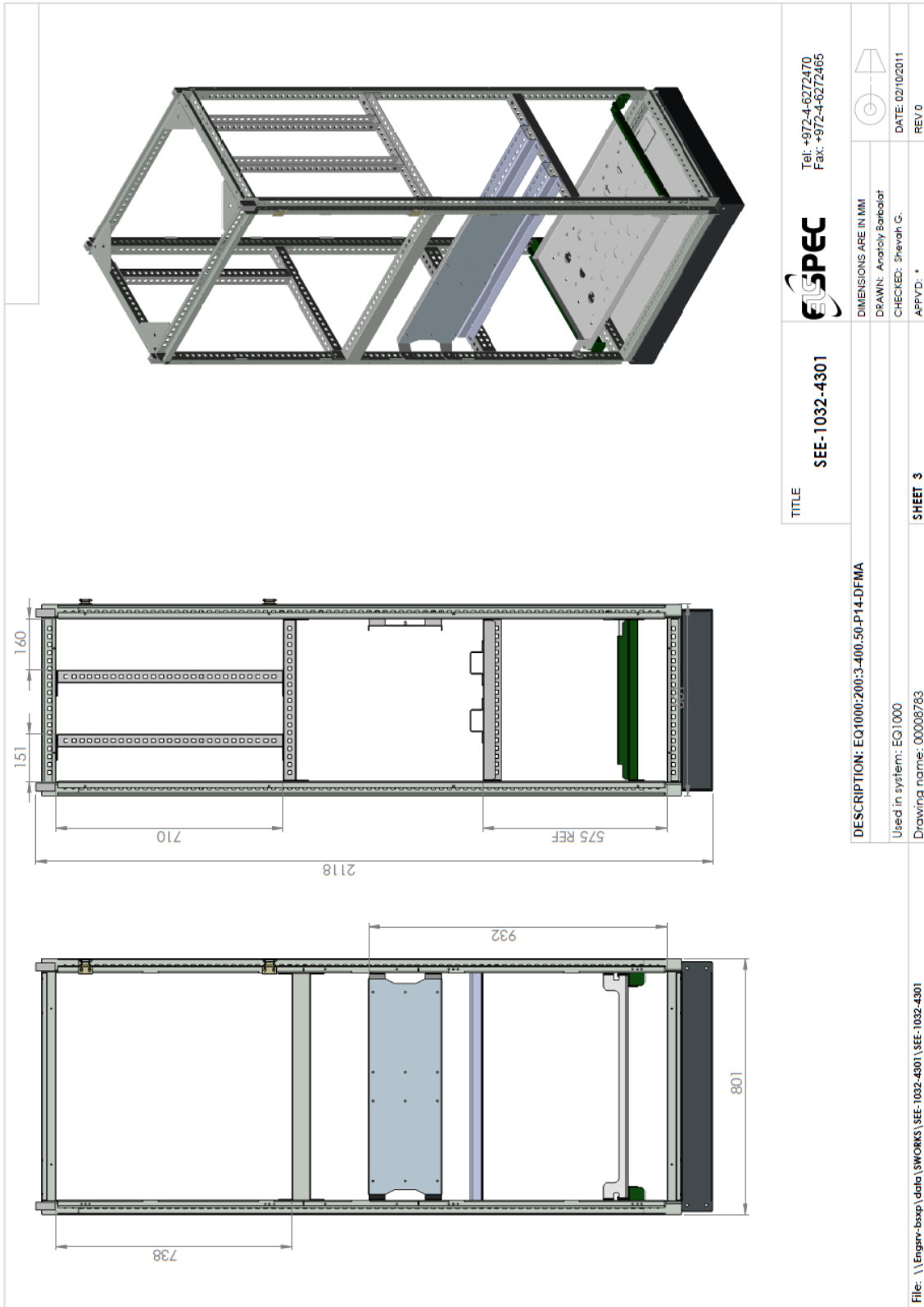
- [20] Vishay. [Online]. [www.vishay.com](http://www.vishay.com)
- [21] Ducati Energia. [Online]. [www.ducatienergia.it](http://www.ducatienergia.it)
- [22] Wikipedia. Film Capacitors. [Online]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Film\\_capacitor](http://en.wikipedia.org/wiki/Film_capacitor)
- [23] EDE KONDANSATÖR. [Online]. [www.edecapacitor.com](http://www.edecapacitor.com)
- [24] Frako. [Online]. [www.frako.com](http://www.frako.com)
- [25] Schneider Electric. [Online]. [www.schneider-electric.com](http://www.schneider-electric.com)
- [26] Electronics Tutorials. [Online]. [www.electronics-tutorials.ws](http://www.electronics-tutorials.ws)
- [27] Lovato Electric. [Online]. [www.lovatoelectric.com](http://www.lovatoelectric.com)
- [28] Elspec. [Online]. [www.elspec-ltd.com](http://www.elspec-ltd.com)
- [29] Elspec. General Overview of Harmonics in Power Networks with PFC Capacitors.
- [30] Schaffner EMV AG. [Online]. [www.schaffner.com](http://www.schaffner.com)
- [31] Circutor SA. [Online]. [www.circutor.com](http://www.circutor.com)
- [32] J. Neves dos Santos, Compensação do Factor de Potência, 2006, FEUP.
- [33] Cabelte. [Online]. [www.cabelte.pt](http://www.cabelte.pt)
- [34] Alfredo Barbosa Henriques and Jorge Crispim Romão, *Electromagnetismo.*: IST Press, 2006.
- [35] Phenix Technologies. [Online]. [www.phenixtech.com](http://www.phenixtech.com)

## **Anexos**

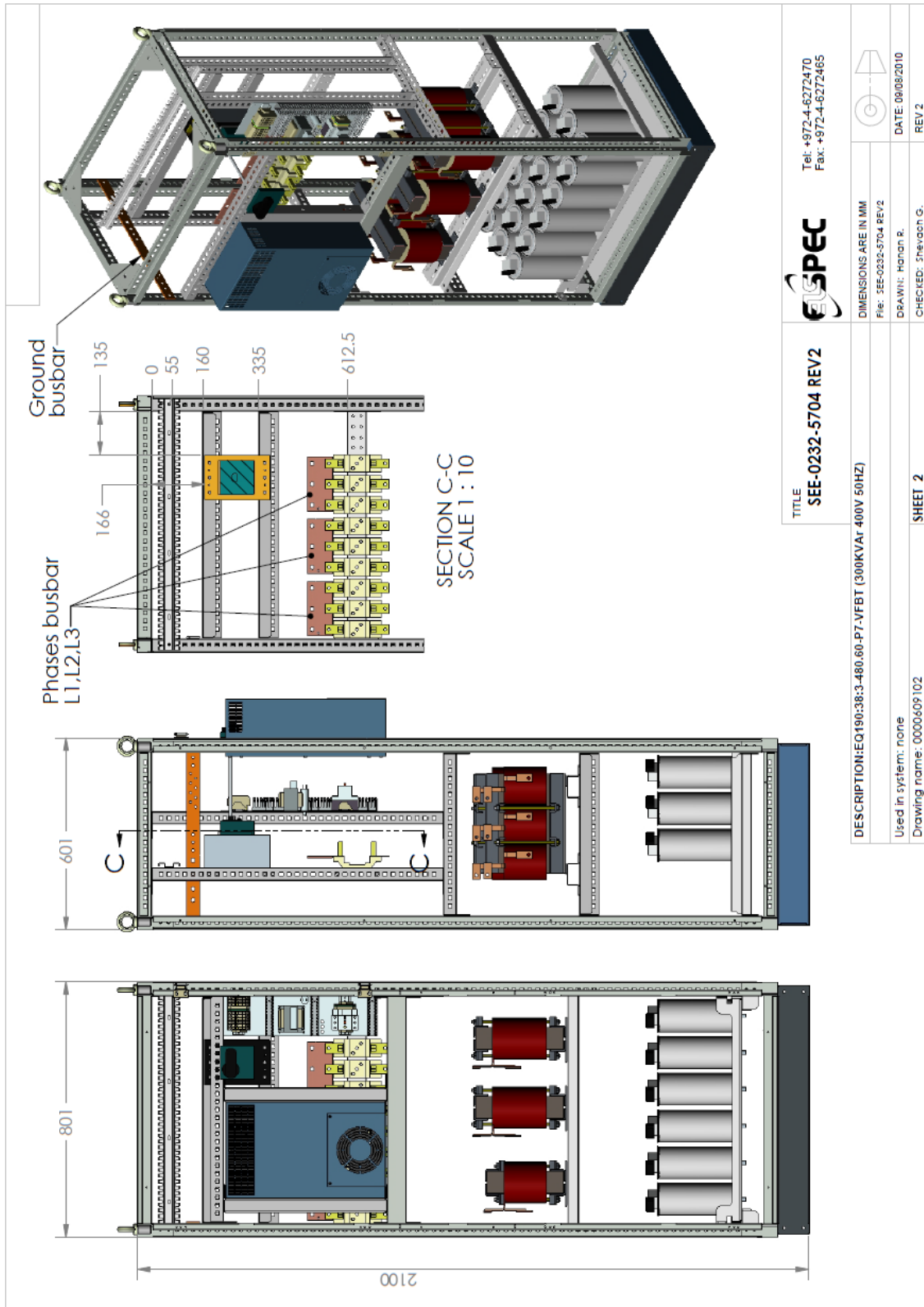


B (T)	M111-35N	M330-50A	M530-50A
<b>0,80</b>	<b>0,310</b>	<b>0,900</b>	<b>1,360</b>
0,81	0,317	0,918	1,388
0,82	0,324	0,936	1,416
0,83	0,331	0,954	1,444
0,84	0,338	0,972	1,472
0,85	0,345	0,990	1,500
0,86	0,352	1,008	1,528
0,87	0,359	1,026	1,556
0,88	0,366	1,044	1,584
0,89	0,373	1,062	1,612
<b>0,90</b>	<b>0,380</b>	<b>1,080</b>	<b>1,640</b>
0,91	0,388	1,101	1,672
0,92	0,396	1,122	1,704
0,93	0,404	1,143	1,736
0,94	0,412	1,164	1,768
<b>0,95</b>	0,420	1,185	1,800
0,96	0,428	1,206	1,832
0,97	0,436	1,227	1,864
0,98	0,444	1,248	1,896
0,99	0,452	1,269	1,928
<b>1,00</b>	<b>0,460</b>	<b>1,290</b>	<b>1,960</b>
1,01	0,469	1,314	1,997
1,02	0,478	1,338	2,034
1,03	0,487	1,362	2,071
1,04	0,496	1,386	2,108
<b>1,05</b>	0,505	1,410	2,145
1,06	0,514	1,434	2,182
1,07	0,523	1,458	2,219
1,08	0,532	1,482	2,256
1,09	0,541	1,506	2,293
<b>1,10</b>	<b>0,545</b>	<b>1,530</b>	<b>2,330</b>
1,11	0,556	1,557	2,371
1,12	0,567	1,584	2,412
1,13	0,578	1,611	2,453
1,14	0,589	1,638	2,494
<b>1,15</b>	0,600	1,665	2,535
1,16	0,611	1,692	2,576
1,17	0,622	1,719	2,617
1,18	0,633	1,746	2,658
1,19	0,644	1,773	2,699
<b>1,20</b>	<b>0,650</b>	<b>1,800</b>	<b>2,740</b>

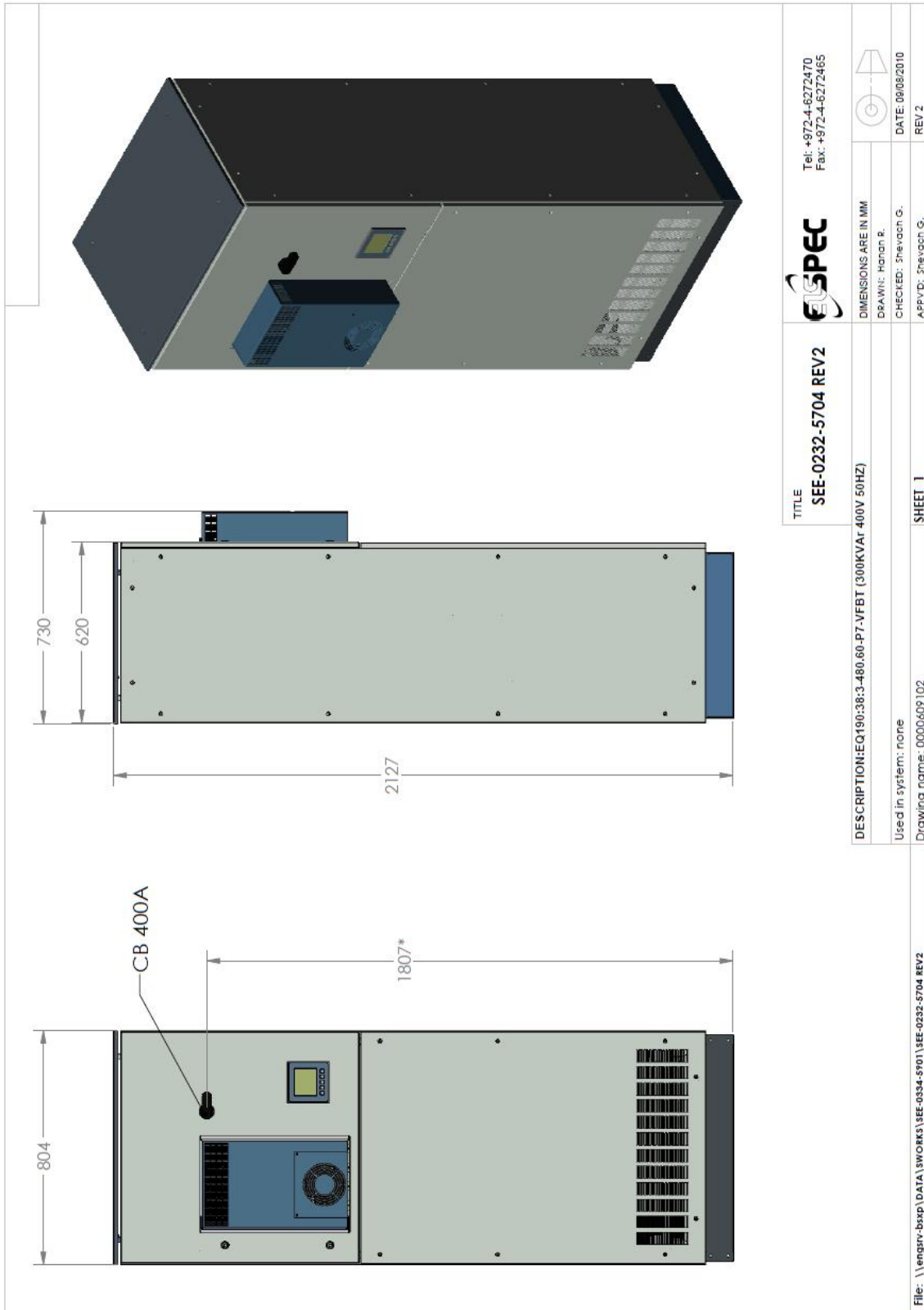
Anexo 2 - Perdas específicas em W/kg para diferentes valores do campo magnético e tipos de chapa.



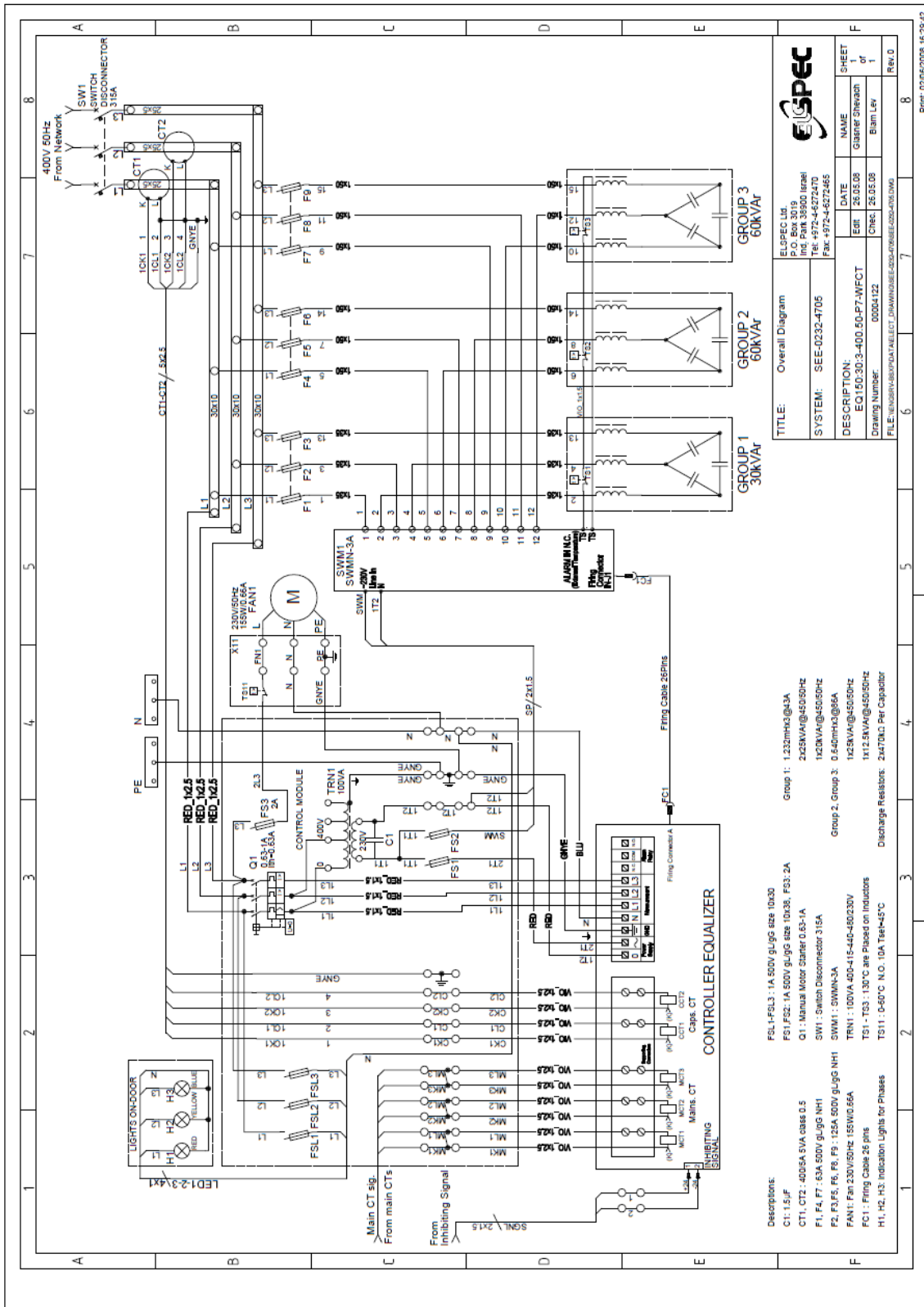
Anexo 3 - Estrutura metálica onde são instalados os componentes.



Anexo 4 - Disposição dos componentes no interior do sistema.



Anexo 5 - Aspeto final do armário e respetivas dimensões exteriores.



ELSPEC Ltd. P.O. Box 3019 Industrial Area Tel: +972-4-6272470 Fax: +972-4-6272465	
<b>TITLE:</b> Overall Diagram	<b>SYSTEM:</b> SEE-0232-4705
<b>DESCRIPTION:</b> EO150:30:3-400:50-P7-WFCT Drawing Number: 00004122	<b>DATE:</b> 26.05.08 <b>CHK:</b> 26.05.08 <b>FILE:</b> ENGR\8888\PROJECT_DRAWING\EE0232-4705.DWG
<b>NAME:</b> Gabriel Shevach <b>Blum Lay</b>	<b>SHEET:</b> 1 of 1
<b>Rev. 0</b>	<b>Rev. 0</b>

Anexo 6 - Esquema elétrico de um sistema simétrico.

