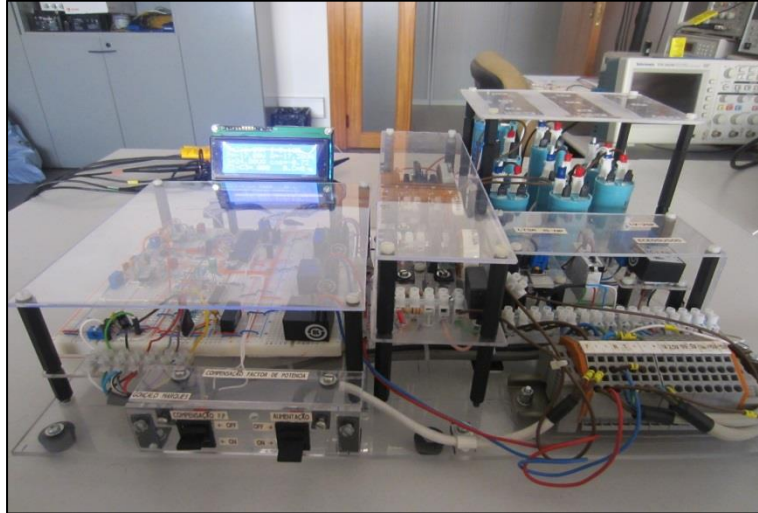




INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação



Compensação da Energia Reactiva com Minimização de Perturbações sobre a Rede Eléctrica

GONÇALO FERREIRA MARQUES
(Licenciado)

Trabalho Final de Mestrado para a obtenção de grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica – Ramo de Automação e Electrónica Industrial

Orientador:

Professor Doutor Vasco Emanuel Anjos Soares

Júri:

Presidente: Professor João Herminio Ninitas Lagarto

Vogais:

Professor : Vasco Emanuel Anjos Soares

Professor : Fernando Manuel Duarte Oliveira Nunes

Dezembro de 2015

Agradecimentos

A realização e conclusão desta dissertação de mestrado são o culminar de um objectivo pessoal, traçado quando iniciei os estudos no ensino superior, onde sempre pretendi enriquecer o meu conhecimento nesta área, para complemento da minha actividade profissional. Contudo, a sua realização só foi possível com a ajuda e empenho de algumas pessoas, cuja ajuda quero agradecer profundamente.

Agradeço de uma forma especial ao Professor Vasco Emanuel Anjos Soares, por ter sido o meu orientador científico, a sua dedicação, disponibilidade e rigor na orientação da dissertação.

À Área Departamental de Engenharia e Sistemas de Potência e Automação (ADEEEA) do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), pela utilização do laboratório e recursos materiais necessários para a realização desta dissertação.

Aos meus pais, pela ajuda e apoio que sempre demonstraram ao longo das diversas fases da minha formação.

À minha esposa, Sílvia Teixeira, por toda a atenção, paciência, carinho e apoio que sempre demonstrou, em todos os momentos, sendo uma forte contribuição para ultrapassar todos os obstáculos.

Aos meus eternos amigos, que tive o prazer de conhecer no ISEL, pela amizade, companheirismo e espírito de entajuda ao longo de todos estes anos. Juntos passámos momentos de grande diversão, assim como contribuímos para o sucesso de cada um de nós.

A todas aquelas pessoas, amigos e colegas, que não foram aqui mencionados, cujo contributo foi útil para o desenvolvimento e conclusão desta dissertação, expresso aqui a minha gratidão.

Resumo

Ao longo dos últimos anos com o grande crescimento económico e industrial a qualidade da energia eléctrica tornou-se uma grande preocupação, devido ao crescente uso da electrónica de potência, contribuindo assim para o aumento do número de cargas não lineares, e criando um problema de um reduzido factor de potência.

A compensação da energia reactiva assume assim um papel importante, uma vez que o factor de potência é um importante indicativo de uma gestão adequada e um correcto do uso de energia eléctrica.

Este documento descreve o projecto de um sistema de compensação da energia reactiva baseado na tecnologia *Static Var Compensator* (SVC). Trata-se, portanto, de um sistema capaz de efectuar a medição das grandezas da rede e da carga, interpretar os seus valores e efectuar a respectiva compensação da potência reactiva associada a primeira harmónica, através da ligação de um banco de condensadores com dispositivos semicondutores na zona saturação.

Comparativamente com alguns dos sistemas de compensação já implementados da rede eléctrica pretende-se dar um contributo para o desenvolvimento de novos sistemas de compensação no que diz respeito a redução das perturbações causadas pelos efeitos transitórios na comutação dos bancos de condensadores.

Palavras chave: Factor de Potência, Compensação da Energia Reactiva, Aquisição e Condicionamento de Sinais, Microcontrolador, Electrónica de Potência, Bateria de Condensadores.

Abstract

Over the past few years with the great economic and industrial growth the quality of electric power has become a major concern due to the increasing use of power electronics, thereby contributing to the increasing number of non-linear loads, and creating a problem a poor power factor.

The reactive power compensation thus plays an important role, since the power factor is an important indicator of proper management and proper use of electrical energy.

This document describes the design of a reactive power compensation system Static Var Compensator based on technology (SVC). It is therefore capable of performing the measurement of the network and load magnitudes system, interpret its values and perform their reactive power compensation of the first harmonic, by connecting a bank of capacitors with semiconductor devices in saturation zone.

Compared to some of the compensation systems already implemented the mains aims to make a contribution to the development of new clearing system regarding the reduction of disturbances caused by transients on the switching of capacitor banks.

Keywords: Power Factor, Reactive Power Compensation, Acquisition and Signal Conditioning, Microcontroller, Power Electronics, capacitors battery.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Abstract.....	v
Lista de figuras.....	xi
Lista de tabelas.....	xv
Abreviaturas.....	1
1. Introdução	2
1.1. Motivação	2
1.2. Objectivos	3
1.3. Estrutura da dissertação	4
2. Qualidade da Energia Eléctrica.....	5
2.1. Introdução	5
2.2. Caracterização das cargas eléctricas	7
2.2.1. Cargas Eléctricas Lineares	7
2.2.2. Cargas Eléctricas não Lineares	7
2.3. Problemas da Qualidade da Energia Eléctrica.....	9
2.3.1. Transitórios	9
2.3.1.1. Transitórios Impulsivos	9
2.3.1.2. Transitórios Oscilatórios.....	10
2.3.2. Variações de tensão de curta-duração	10
2.3.2.1. Interrupção de curta-duração	10
2.3.2.2. Sub-tensões de curta-duração	11
2.3.2.3. Sobretensão de Curta Duração	11
2.3.3. Variações de tensão de longa-duração	12
2.3.4. Desequilíbrios de tensão	12
2.3.5. Distorções na Forma de onda.....	12
2.3.5.1. Nível CC.....	13
2.3.5.2. Harmónicas.....	13
2.3.5.3. Inter-harmónicas.....	14

2.3.5.4.	Ruídos	14
2.3.5.5.	“Notching” ou recorte na tensão	15
2.3.5.6.	Tremulação (Fliker)	15
2.4.	Factor de Potência	16
2.4.1.	Potência Instantânea e Média	16
2.4.2.	Valor Eficaz ou <i>RMS</i> (<i>Root Mean Square</i>).....	18
2.4.3.	Potência Aparente e Factor de Potência	20
2.4.4.	Potência Complexa	21
2.4.5.	Correcção do factor Potência.....	24
2.5.	Normas da Qualidade de Energia.....	26
2.5.1.	Requisitos Principais da Norma EN 50160	26
2.5.2.	Norma IEC 60950-1 (Descarga de Condensadores em equipamentos).....	27
3.	Equipamento para Compensação da Energia Reactiva	28
3.1.	Introdução.....	28
3.2.	Tipos de Compensação.....	29
3.2.1.	Compensação individual.....	29
3.2.2.	Compensação Parcial por Grupos de Cargas.....	30
3.2.3.	Compensação Centralizada.....	30
3.2.4.	Compensação Combinada	31
3.2.5.	Compensação com regulação automática.....	31
3.3.	Dispositivos de compensação antes do surgimento dos dispositivos FACTS .32	
3.3.1.	Dispositivos MSR (Mechanical switching of shunt reactor) e MSC (Mechanical switching of shunt capacitors).....	32
3.3.2.	Condensador Síncrono.....	33
3.3.3.	Reactâncias Saturadas.....	34
3.4.	Dispositivos FACTS.....	35
3.4.1.	Dispositivos FACTS baseados em impedâncias passivas	36
3.4.2.	SVC (Static Var Compensator)	36
3.4.2.1.	TCR (Thyristor Controlled Reactor).....	37
3.4.2.2.	TSC (Thyristor Switched Capacitor)	38
3.5.	STATCOM.....	39
4.	Implementação do Mosfet Switched Capacitor.....	40

4.1.	Introdução	40
4.2.	Diagrama de Blocos do <i>Mosfet Switched Capacitor</i> (<i>Parte de Comando</i>)	41
4.3.	Circuitos do Sistema de Aquisição	43
4.3.1.	Circuitos de Alimentação da parte de Comando.....	44
4.3.1.1.	Conversor AC/DC ECE05US05.....	44
4.3.1.2.	Fonte Comutada NMH0515SC	45
4.3.1.3.	Precision Virtual Ground TLE 2426	45
4.3.2.	Circuitos de Alimentação da parte de Potência.....	46
4.3.3.	Circuitos de Aquisição da Tensão da Rede e Corrente da Carga.....	47
4.3.4.	Circuitos de Condicionamento dos Sinais Analógicos	51
4.3.4.1.	Circuito Amplificador Somador Não Inversor	51
4.3.4.2.	Amplificador de Ganho Variável (PGA).....	52
4.3.4.3.	Filtragem analógica dos sinais de tensão e corrente.....	53
4.3.4.4.	Rectificação dos Sinais de tensão e corrente	59
4.3.4.5.	Circuito de detecção da passagem por zero da tensão e corrente	62
4.3.4.6.	Circuito detector de Pico	63
4.3.5.	Circuitos de Comando e Processamento	64
4.3.5.1.	Microcontrolador PIC18F4520	64
4.3.5.2.	LCD (20x4) RT204-1	66
4.3.6.	Circuitos de Disparo dos Mosfet's.....	66
4.3.7.	Circuitos de Comutação	67
4.3.8.	Circuitos de Compensação	68
4.3.9.	Condensadores	68
4.4.	Circuito de carga e descarga dos condensadores	69
4.4.1.	Circuitos da Carga RL.....	70
4.5.	Implementação do Sistema - Software	71
4.5.1.	Fluxograma Geral do Sistema de Compensação.....	71
4.5.2.	Fluxograma da Identificação do Ganho a ser aplicado no PGA	72
4.5.3.	Fluxograma do cálculo do valor da tensão eficaz da rede.....	73
4.5.4.	Fluxograma do cálculo do valor da corrente eficaz da rede.....	74
4.5.5.	Fluxograma do cálculo do desfasamento entre a tensão e corrente	75
4.5.6.	Fluxograma do cálculo das Potências	76

4.5.7.	Fluxograma da determinação da condição dos escalões de condensadores .	77
4.5.8.	Fluxograma da comutação do banco de condensadores	78
4.5.9.	Configuração dos módulos do microcontrolador	79
4.5.9.1.	Configuração do ADC	79
4.5.9.2.	Configuração do módulo Capture	83
4.5.9.3.	Configuração do módulo SPI.....	84
5.	Resultados experimentais	87
5.1.	Aquisição da Tensão da Rede	87
5.2.	Aquisição da Corrente da Carga.....	89
5.3.	Aquisição da defasagem entre a tensão e a corrente e verificação do momento da ordem de comando para a comutação dos Bancos de Condensadores.....	90
5.4.	Compensação da Potência Reactiva	91
5.4.1.	Validação das grandezas obtidas pelo sistema MSC	91
5.4.2.	Compensação do Factor de Potência	93
5.4.2.1.	Carga Indutiva com $L = 1,1 \text{ H}$	93
5.4.2.2.	Carga Indutiva com $L = 0,4 \text{ H}$	94
5.4.2.3.	Factor de Potência em função da variação de $L(H)$	95
6.	Conclusões.....	96
6.1.	Trabalhos Futuros.....	97
7.	Bibliografia.....	99
8.	ANEXOS.....	100
8.1.	Anexo 1– Esquema Eléctrico Geral	101

Lista de figuras

Figura 2.1 – Circuito Resistivo	7
Figura 2.2 – Circuito RLC	7
Figura 2.3 – Exemplos de Cargas Não Lineares.....	7
Figura 2.4 - Exemplo de um Rectificador a díodos e respectivas formas de onda.....	8
Figura 2.5 - Exemplo da forma de onda de um Transitório Impulsivo	9
Figura 2.6 - Exemplo da forma de onda de um Transitório Oscilatório.....	10
Figura 2.7 - Exemplo da forma de onda de uma interrupção de curta duração	10
Figura 2.8 - Exemplo da forma de onda de uma Sub-tensões de curta-duração.....	11
Figura 2.9 - Exemplo da forma de onda de uma Sobretensões de Curta-Duração	11
Figura 2.10 - Exemplo da forma de onda com distorção harmónica.....	13
Figura 2.11 - Exemplo da forma de onda na presença de inter-harmónicas.....	14
Figura 2.12 - Exemplo da forma de onda na presença de ruído de alta frequência.....	14
Figura 2.13 - Exemplo da forma de onda na presença “Notching”	15
Figura 2.14 - Exemplo da forma de onda na presença de Flutuações de Tensão	15
Figura 2.15 - Carga Linear alimentada por Fonte Sinusoidal.....	16
Figura 2.16 – Circuito DC	18
Figura 2.17 – Circuito AC	18
Figura 2.18 - Triângulo das potências	23
Figura 2.19 – Carga Indutiva/Capacitiva.....	23
Figura 2.20 - Carga Indutiva.....	24
Figura 2.21 – Carga Compensada.....	24
Figura 2.22 – Diagrama das correntes e tensões na compensação de uma carga indutiva..	24
Figura 2.23 – Triângulo das Potências.....	25
Figura 3.1 – Diagrama de Blocos da Compensação da Energia Reactiva.....	28
Figura 3.2 - Exemplo de uma rede com Compensação Individual.....	29
Figura 3.3 - Exemplo de Rede com Compensação Parcial por Grupo de Cargas	30
Figura 3.4 - Exemplo de Rede com Compensação Centralizada.....	30
Figura 3.5 - A relação entre a corrente do estator e corrente de campo no condensador síncrono.	33
Figura 3.6 – Reactância Saturada	34

Figura 3.7 - Esquema unifilar monofásico do TCR	37
Figura 3.8 – Formas de onda da Tensão e Corrente do TCR	37
Figura 3.9 - Esquema unifilar monofásico do TSC.....	38
Figura 3.10 - Formas de onda da Tensão e Corrente do TSC	38
Figura 3.11 – Diagrama de blocos do STATCOM	39
Figura 4.1 - Sistema de Compensação Mosfet Switched Capacitor	40
Figura 4.2 – Diagrama de Blocos do Sistema de Compensação (Parte Comando)	41
Figura 4.3 – Diagrama de Blocos dos Circuitos do Sistema.....	43
Figura 4.4 – Esquema de Ligações dos Circuitos de Alimentação (Comando).....	44
Figura 4.5 – Conversor AC/DC ECE05US05	44
Figura 4.6 - Fonte comutada NMH0515SC	45
Figura 4.7 – Precision Virtual Ground TLE 2426.....	45
Figura 4.8 – Esquema de Ligações dos Circuitos de Alimentação (Potência).....	46
Figura 4.9 - Conversor AC/DC ECE05US15.....	46
Figura 4.10 - Transdutor de tensão LEM© LV 25-P	47
Figura 4.11 - Esquema de montagem do transdutor de tensão LV 25-P.....	47
Figura 4.12 – Diagrama de blocos (Resistências de Ajuste).....	48
Figura 4.13 – Esquema de ligação das resistências de ajuste.....	48
Figura 4.14 - Transdutor de corrente LEM© LTSR 15-NP.....	49
Figura 4.15 – Formas de onda da tensão do transdutor de corrente.....	49
Figura 4.16 - Esquema de montagem do transdutor de tensão LTSR 15-NP	49
Figura 4.17 – Esquema de Ligações do Primário do Transdutor de Corrente	50
Figura 4.18 – Diagrama de Blocos e esquema de ligações do Somador não Inversor.....	51
Figura 4.19 – Formas de onda da tensão do Somador não Inversor	51
Figura 4.20 - Diagrama de Blocos e esquema de ligações do “PGA”	52
Figura 4.21 - Formas de onda da tensão do “PGA”	52
Figura 4.22 – Diagrama de Blocos Filtro Passa-Baixo da cadeia tensão/corrente.....	53
Figura 4.23 – Filtragem dos Sinais de tensão e corrente.....	53
Figura 4.24 – Circuito de Filtragem	56
Figura 4.25 – Formas de onda antes e após do rectificador de precisão	59
Figura 4.26 - Circuito rectificador de precisão de onda completa	59
Figura 4.27 – Circuito de obtenção do valor médio da tensão de entrada	60

Figura 4.28 – Circuito da detecção da passagem por zero da tensão e corrente.....	62
Figura 4.29 – Diagrama de blocos e esquema de ligações do MCP6542.....	62
Figura 4.30 – Formas de onda da detecção da passagem por zero da tensão e corrente	63
Figura 4.31 – Diagrama de blocos e circuito do detector de pico	63
Figura 4.32 – Microcontrolador PIC18F4520	64
Figura 4.33 – Programador PICKIT3	64
Figura 4.34 – Identificação dos pinos utilizados no μC	65
Figura 4.35 – Display LCD 20x4.....	66
Figura 4.36 – Circuito de Disparo dos Mosfets	66
Figura 4.37 - Mosfet de Potência IXFM24N80P.....	67
Figura 4.38 - Ponte Rectificadora PB3010	67
Figura 4.39 – Sentido da corrente nos circuitos de comutação	67
Figura 4.40 – Condensadores de Compensação da Potência Reactiva.....	68
Figura 4.41 – Diagrama de blocos dos circuitos de carga e descarga dos condensadores ..	69
Figura 4.42 – Carga RL	70
Figura 4.43 – Fluxograma Geral do Funcionamento do Sistema de Compensação	71
Figura 4.44 - Fluxograma da Identificação do Ganho a ser aplicado no PGA.....	72
Figura 4.45 - Fluxograma do cálculo do valor da tensão eficaz da rede	73
Figura 4.46 – Fluxograma do cálculo do valor da corrente eficaz da rede.....	74
Figura 4.47 – Fluxograma do cálculo do desfasamento entre a tensão e corrente	75
Figura 4.48 - Fluxograma do cálculo das Potências	76
Figura 4.49 - Fluxograma da determinação das condições dos Escalões de Condensadores	77
Figura 4.50 - Fluxograma da Comutação dos Bancos de Condensadores.....	78
Figura 4.51 - Diagrama de Blocos do Conversor A/D	79
Figura 4.52 - Esquema do módulo Capture	83
Figura 4.53 - Esquema do módulo SPI	84
Figura 5.1 - TM39.....	87
Figura 5.2 - Display LCD	87
Figura 5.3 - Osciloscópio.....	87
Figura 5.4 – Resistência de medição (Tensão da Rede)	87
Figura 5.5 – Filtro Passa-Baixo (Tensão da Rede)	88

Figura 5.6 – Valor Médio (Tensão da Rede).....	88
Figura 5.7 – Tensão no secundário do transdutor (Corrente da Carga)	89
Figura 5.8 - Filtro Passa-Baixo (Corrente da Carga)	89
Figura 5.9 - Valor Médio (Corrente da Carga).....	90
Figura 5.10 - Desfasamento entre a tensão e a corrente.....	90
Figura 5.11 - Momento da activação dos bancos	90
Figura 5.12 – Disposição dos equipamentos de medição.....	91
Figura 5.13 - Evolução das Potências em função da variação de L(H)	92
Figura 5.14 - Compensação “Desligada” com L=1,1H.....	93
Figura 5.15 - Compensação “Ligada” com L=1,1H.....	93
Figura 5.16 -Compensação Desligada com L=0,4H	94
Figura 5.17 - Compensação “Ligada” com L=0,4H.....	94
Figura 5.18 – Variação do $\cos \varphi$ (sem compensação) e do FP (com compensação)	95

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tipo de carga e respectivo factor de potência.....	22
Tabela 2 – Resumo das Potências associadas ao Factor de Potência	23
Tabela 3 - Requisitos Principais da Norma EN 50160	26
Tabela 4 -Valor individual das tensões harmónicas dadas em percentagem da tensão nominal do sistema	27
Tabela 5 – Configuração do Número de espiras no Primário.....	50
Tabela 6 – Dados do Filtro	54
Tabela 7 – Descrição da função dos pinos utilizados	65
Tabela 8 – Escalões de Compensação	68
Tabela 9 - Registo dos valores dados pelo Sistema MSC e o Analisador de rede.....	91
Tabela 10 - Valores Registados do Analisador de Rede para $L = 1,1 H$	93
Tabela 11 - Valores Registados do Analisador de Rede para $L = 0,4 H$	94



Abreviaturas

Lista de Abreviaturas:

ADC	Analog-to-digital converter
CA	Corrente alternada (<i>Alternating Current</i>)
CC	Corrente contínua (<i>Direct Current</i>)
CI	Circuito Integrado
FACTS	<i>Flexible AC Transmission Systems</i>
FP	Factor de Potência
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
QEE	Qualidade de Energia Eléctrica
MOSFET	Transístores de efeito de campo (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
MSC	Mosfet Switch Capacitor
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SVC	Static Var Compensator
SPI	Serial Peripheral Interface
TCR	Thyristor-Controlled Reactor
TSC	Thyristor Switched Capacitor
RMS	Valor Eficaz (Root Mean Square)

1. Introdução

Este primeiro capítulo tem como objectivo fazer uma breve introdução a todo o trabalho desenvolvido. Serão apresentadas algumas considerações sobre o tema e seguidamente o respectivo enquadramento, as motivações e os objectivos do trabalho.

1.1. Motivação

Cada vez mais a preocupação com a qualidade da energia eléctrica assume um papel importante nas sociedades altamente industrializadas e tecnologicamente desenvolvidas. O aumento da população e o crescente desenvolvimento industrial teve como consequência um o aumento das necessidades energéticas, verificou-se um aumento das cargas eléctricas que necessitam de energia reactiva indutiva para funcionar.

Esta condição resulta num aumento da corrente total que circula nas redes de distribuição de energia eléctrica, podendo sobrecarregar as subestações, as linhas de transmissão e distribuição, prejudicando a estabilidade e as condições de aproveitamento dos sistemas eléctricos, trazendo inconvenientes diversos, tais como: perdas na instalação, quedas de tensão e subutilização da capacidade instalada, pelo que o seu consumo deverá ser controlado.

Esta sobrecarga dos sistemas existentes vai contribuir para que haja a necessidade de construção de novas centrais de produção e linhas de transmissão que no contexto actual, devido aos elevados custos e as questões ambientais vai condicionar o desenvolvimento do sector energético.

Assim sendo a eficiência energética assume uma importância cada vez mais crucial quer a nível da produção quer do consumo, um dos métodos mais económicos para melhorar a eficiência do sistema, e corrigir o factor de potência. O factor de potência e um dos indicadores da qualidade da energia, traduz o grau de eficiência do uso dos sistemas eléctricos, é definido como a relação entre a potência activa e a potência aparente, cujo valor pode variar entre 0 e 1. Valores baixos indicam um mau aproveitamento, valores altos de factor de potência próximos de 1 indicam um uso eficiente de energia eléctrica.

Enquanto a energia activa é necessária para produzir trabalho, por exemplo, a rotação do eixo do motor, a reactiva é necessária para produzir o fluxo magnético indispensável ao funcionamento dos motores, transformadores, etc. No entanto essa energia “ocupa espaço” que poderia ser utilizado para transportar energia activa.

A Compensação da energia reactiva é um meio económico e eficaz para aumentar a qualidade do factor de potência, a questão da baixa qualidade do factor de potência, e considerada como um problema fundamental em sistemas de transmissão e distribuição de potência.

Os primeiros sistemas de compensação apresentados permitiam apenas a compensação através da introdução em série, ou em paralelo, de bobinas ou condensadores através da sua interligação de forma manual, no entanto esta forma não satisfazia as necessidades imediatas do sistema. Com a introdução de sistemas automáticos de entrada/saída de serviço dos componentes reactivos, esta limitação foi reduzida significativamente.



Com o evoluir da electrónica de potência foram desenvolvidos alguns sistemas avançados em termos tecnológicos, permitindo também uma resposta bastante eficaz na compensação evitando perturbações que possam surgir da comutação dos elementos.

O sistema de compensação estudado e proposto neste trabalho, ilustra precisamente o importante contributo que a electrónica de potência pode ter em termos de Qualidade de Potência. Trata-se de uma solução baseada em semicondutores de potência que permite uma compensação de potência reactiva totalmente automática e com melhor resposta dinâmica do que a dos sistemas tradicionais.

1.2. Objectivos

A realização desta dissertação de mestrado teve como base o estudo da compensação do factor de potência com minimização dos transitórios criados pela entrada ou saída de serviço dos escalões de condensadores. Pretende-se com este trabalho construir um sistema para a compensação da potência reactiva indutiva em rede monofásicas de baixa tensão, para a concretização deste objecto é necessário:

- Desenvolvimento do Sistema de Aquisição e Condicionamento dos sinais
- Desenvolvimento de um programa com algoritmos de leitura, processamento e controlo a ser implementado num microcontrolador.
- Desenvolvimento do Sistema de Controlo Mosfet Switched Capacitor.
- Desenvolvimento do Banco de Condensadores
- Desenvolvimento de simulações computacionais, com diversas situações de forma a simular e estudar formas de minimizar as perturbações impostas na rede no momento da comutação dos condensadores.
- Validação do sistema experimentalmente em laboratório, elaboração de um conjunto de simulações do funcionamento do Mosfet Switched Capacitor usando uma carga RL variável.

1.3. Estrutura da dissertação

A organização desta dissertação é feita em seis capítulos, sendo eles:

Cada capítulo e anexo são descritos me seguida, resumidamente:

No capítulo 1, Introdução, é efectuada uma descrição introdutória do principal tema abordado nesta dissertação, qual a sua motivação, os seus objectivos principais e a sua organização.

No capítulo 2, Qualidade da Energia eléctrica, é apresentado alguns dos principais problemas que afectam a Qualidade da Energia Eléctrica.

No capítulo 3, Equipamentos para Compensação da Potência Reactiva, é efectuada apresentação de alguns equipamentos que são utilizados para compensação.

No capítulo 4, Implementação *do Mosfet Switched Capacitor*, é efectuada uma descrição dos vários módulos que constituem o protótipo experimental que foi construído para a realização dos ensaios práticos.

No capítulo 5, Resultados experimentais, são apresentados os resultados experimentais que mostram o funcionamento e desempenho do sistema de compensação *Thyristor Switched Capacitor*, que foi implementado no âmbito desta dissertação.

No capítulo 6, Conclusões, é efectuada um resumo de todo o trabalho desenvolvido nesta dissertação realçando as diversas conclusões que foram obtidas. Também é apresentada uma análise dos possíveis trabalhos futuros que poderão ser desenvolvidos a partir desta dissertação.

No Anexo I, Esquema eléctrico Geral do protótipo proposto.



2. Qualidade da Energia Eléctrica

Neste capítulo será feita uma abordagem sobre a questão da Qualidade de Energia Eléctrica, assunto de especial interesse nos dias de hoje, pretende-se apresentar alguns dos principais problemas que afectam a Qualidade de Energia, as suas causas, consequências e algumas sugestões para a sua resolução dos problemas.

2.1. Introdução

A energia eléctrica é um dos bens mais importantes para o desenvolvimento e sustentabilidade de uma sociedade, é produzida e comercializada sendo vista como um produto, por este mesmo motivo foi necessário definir parâmetros que determinassem as suas características de qualidade, de forma a garantir que o fornecimento fosse feito de acordo com esses parâmetros e pudesse satisfazer as necessidades dos diversos consumidores de energia eléctrica.

O conceito de Qualidade de energia assumiu uma maior importância a nível da distribuição e produção de energia, cada vez mais existe a necessidade de se conseguir um fornecimento contínuo e sem falhas para um maior número de clientes, o conceito tem vindo a sofrer alterações ao longo dos tempos devido as sucessivas alterações tecnológicas.

A qualidade de energia tem diferentes significados para diferentes tipos de pessoas, pode ser definido como um conjunto de fenómenos electromagnéticos que ocorrem nos sistemas de energia e que se manifestam na tensão sinusoidal da rede, provocando a deterioração da forma de onda a nível de forma, amplitude, resultando numa falha ou má operação de sistemas e equipamentos.

Por parte dos clientes houve a necessidade do aumento da produtividade e rentabilização dos processos de produção o que levou a uma maior utilização de sistemas e maquinas mais eficientes, tornando-se assim dependentes de sistemas computacionais baseados em microprocessadores que são extremamente sensíveis a uma baixa qualidade de energia. Em alguns dos sectores de actividade com sistemas críticos uma falha nos sistemas de alimentação pode conduzir a consequências graves em termos de segurança e custos económicos.

Para os consumidores de energia eléctrica o assunto da QEE só tem a sua devida importância e atenção quando estes são os motivos para interrupções de fornecimento ou mal funcionamento de equipamentos e processos.

Uma boa qualidade da energia é a base para que os equipamentos funcionem, no entanto depende da fonte e principalmente dos elementos que participam da sua utilização. Isto quer dizer que cada usuário vai interpretar ou melhor vai necessitar de um índice de qualidade da energia de uma forma diferente.

O tema da qualidade de energia eléctrica esta presente nos diversos sectores da energia eléctrica, desde a geração, transmissão e distribuição até ao consumo, passando por problemas relacionados com o funcionamento de equipamentos, comunicação, telefonia, dados, etc. Na essência, o termo é usado para caracterizar qualquer variação na forma de onda das grandezas eléctricas, quer seja em condições de regime transitório ou permanente num sistema eléctrico de energia que pode causar a falha ou mau funcionamento dos equipamentos eléctricos.

A qualidade de energia esta directamente ligada à alteração do padrão de energia gerada, ou seja, à alteração da sinusóide de frequência constante (50 Hz) , que por diversos motivos se modifica. Essa alteração pode ocorrer na amplitude frequência, como já foi dito anteriormente, seja através de interrupções, ruídos, distúrbios, geração e presença de outras frequências diferentes da fundamental (50 Hz).

Alguns dos factores que tem vindo a contribuir para uma necessidade de resolver e prevenir os problemas causados pela falta de qualidade de energia:

- A crescente utilização de equipamentos sensíveis a uma má qualidade de energia;
- Utilização de equipamentos que geram problemas a qualidade de energia;
- Aumento das interligações entre linhas de transporte e distribuição;
- Desregulamentação do sector energético;

A definição e verificação de Qualidade de Energia pode ser feita em termos das características físicas e propriedades da electricidade fornecida, estas são de seguida listadas, considerando arbitrariamente a ordem com que estas aparecem.

- Estabilidade de Tensão;
- Estabilidade de Frequência;
- Conteúdo Harmónico;
- Efeitos da Interferência Electromagnética;
- Balanço de fase;
- Factor de Potência;

Uma Qualidade de Energia perfeita significa que a tensão seja puramente sinusoidal, com amplitude e frequência constante. Na prática, é fisicamente impossível manter uma estabilidade perfeita da tensão e frequência aos terminais dos utilizadores finais do sistema.

O sector eléctrico encontra-se, sobretudo nas duas últimas décadas, a atravessar um período de profundas transformações, cujas consequências ninguém poderá hoje claramente prever. Estas devem-se, em primeira instância, à sua tentativa para dar resposta às grandes alterações da sociedade e às modificações muito rápidas que se têm feito sentir em praticamente todos os domínios que com ele se relacionam.



2.2. Caracterização das cargas eléctricas

Pretende-se fazer uma avaliação das cargas eléctricas presentes no sistema de distribuição de Baixa-Tensão, uma vez que é neste sector que se encontra maioria dos consumidores de energia eléctrica, as cargas podem ser divididas por tipo de consumidores, residenciais e pequenas indústrias.

Verifica-se uma grande variedade do tipo de cargas eléctricas com características particulares de funcionamento e com influências distintas, nomeadamente na respectiva forma de onda de corrente que é gerada e o impacto que a mesma acaba por gerar na rede eléctrica. Devido a isto as cargas podem ser classificadas de cargas lineares e cargas não lineares.

2.2.1. Cargas Eléctricas Lineares

As cargas eléctricas lineares quando alimentadas por uma tensão sinusoidal absorvem também elas uma corrente com a mesmas características sinusoidais. Este tipo de carga é composta por elementos passivos tais como resistências, condensadores e bobines, podendo ser feita uma associação dos mesmos, sendo que na presença de condensadores e/ou bobines é possível um deslocamento de fase entre a tensão e corrente. Estes elementos não influenciam directamente na forma de onda da tensão e a forma de onda da corrente será um espelho da forma de onda da tensão apresentando as mesmas distorções harmónicas encontradas na tensão.

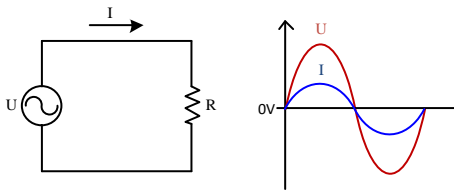


Figura 2.1 – Circuito Resistivo

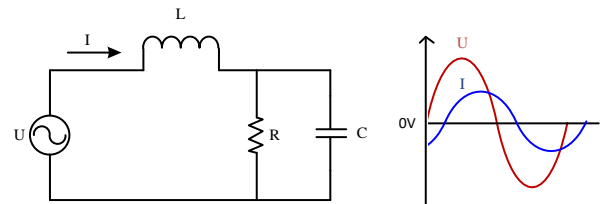


Figura 2.2 – Circuito RLC

2.2.2. Cargas Eléctricas não Lineares

A grande maioria das cargas que hoje em dia são utilizadas, são cargas não lineares, devido a necessidade de um uso de energia eléctrica mais eficiente e controlado recorreu-se ao uso de dispositivos de electrónica de potência, compostos por elementos semicondutores tais como o díodos, transístores, tirístores. Aparelhos electrónicos que possuem na entrada um rectificador monofásico com filtro capacitivo, computadores, lâmpadas fluorescentes compactas, televisões, equipamentos de som, etc. No entanto estes equipamentos originam perturbações muito significativas à qualidade da energia eléctrica.



Figura 2.3 – Exemplos de Cargas Não Lineares

Contrariamente ao que acontece nas cargas lineares, que absorvem uma corrente sinusoidal quando alimentadas por uma tensão sinusoidal, numa carga não linear a forma de onda da corrente apresenta elevada distorção e com características não sinusoidais. Estas cargas são consideradas fontes de componentes harmónicas uma vez que a corrente consumida é constituída por uma componente fundamental e por harmónicas cujas amplitudes e frequências dependem da própria carga.

Este tipo de cargas são considerados um dos principais causadores dos problemas da qualidade da energia eléctrica e ao mesmo tempo acabam por ser vítimas dessa falta de qualidade, pois são altamente sensíveis às variações dos parâmetros característicos da energia eléctrica, as cargas não lineares levam a um aumento das perdas e custos eléctricos.

Grande parte dos equipamentos electrónicos de uso residencial e comercial são alimentados em corrente alternada mas funcionam com corrente contínua, por norma a entrada destes equipamentos é constituída por um rectificador e um condensador de filtragem o que resulta numa corrente de entrada muito distorcida e baixo factor de potência.

Na figura seguinte apresenta-se a forma de onda de uma carga não linear, um rectificador monofásico de onda completa a díodos e com filtro capacitivos.

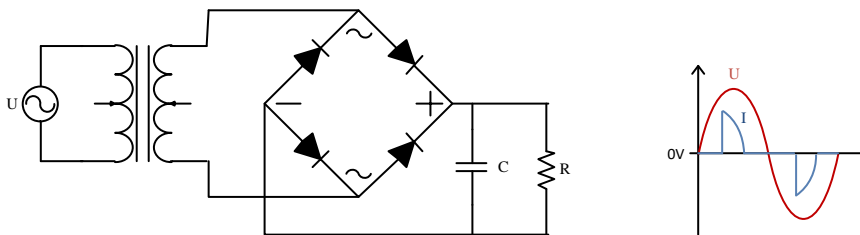


Figura 2.4 - Exemplo de um Rectificador a díodos e respectivas formas de onda

É possível verificar que a forma de onda de corrente apresenta um comportamento não sinusoidal e elevada distorção contrariamente a onda sinusoidal da tensão de alimentação.



2.3. Problemas da Qualidade da Energia Eléctrica

Será feita uma breve apresentação dos problemas relacionados com a qualidade de energia e os problemas associados a estes.

2.3.1. Transitórios

Os transitórios são fenómenos electromagnéticos de curta duração que podem ocorrer no sistema eléctrico consoante determinadas condições operacionais, as variações instantâneas na corrente vão interagir com a impedância tendo como consequências a criação de elevadas tensões instantâneas. É considerado uma das perturbações mais prejudiciais devido a capacidade de danificar equipamentos e processo, principalmente aos mais sensíveis a variações de tensão e corrente. Os transitórios podem ser classificados em duas subcategorias, os transitórios impulsivos e oscilatórios (1)

2.3.1.1. Transitórios Impulsivos

O transitório Impulsivo pode ser definido como uma alteração repentina das condições do regime permanente da tensão, corrente ou ambas sendo caracterizado por apresentar impulsos unidireccionais com polaridade (positiva ou negativa) e com uma frequência diferente da rede eléctrica. Geralmente os transitórios impulsivos são causados por descargas atmosféricas, comutação de cargas indutivas e cortes de energia (1). Estas causas poderão provocar perda de dados em sistemas e/ou a avaria de equipamentos eléctricos.

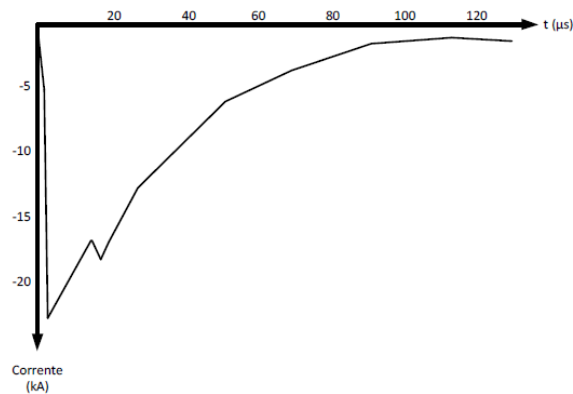


Figura 2.5 - Exemplo da forma de onda de um Transitório Impulsivo

2.3.1.2. Transitórios Oscilatórios

Um transitório oscilatório é caracterizado por uma alteração repentina nas condições nas condições do regime permanente da tensão e/ou corrente possuindo valores de polaridade positiva e negativa (1). Este tipo de transitório pode surgir depois de um transitório impulsivo, depois de operações de comutação efectuadas pelo fornecedor de energia ou pela comutação de bancos de condensadores.

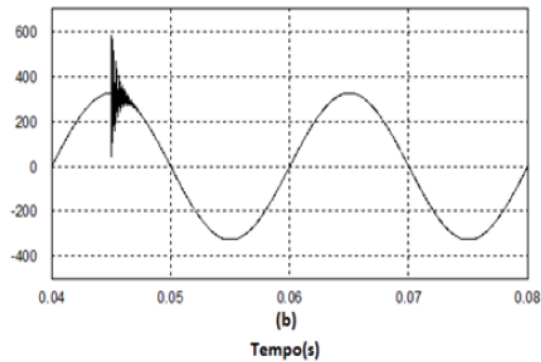


Figura 2.6 - Exemplo da forma de onda de um Transitório Oscilatório

2.3.2. Variações de tensão de curta-duração

As variações de tensão de curta duração são fenómenos que apresentam uma duração 0,5 ciclo e 1 minuto e podem ser caracterizados por alterações instantâneas, momentâneas ou temporárias, dependendo da duração. Estas alterações geralmente podem ser causadas por curto-circuitos, energização de grandes cargas eléctricas, provocando um consumo elevado de corrente, ou devido a falhas intermitentes nas ligações de cabos do sistema.

Este tipo de eventos vai gerar instabilidade no sistema, causando transtornos nos processos de produção, distorcendo a forma de onda da tensão, podendo até interromper o abastecimento de energia eléctrica caso não sejam tomadas às medidas preventivas.

2.3.2.1. Interrupção de curta-duração

Uma interrupção de curta duração ocorre quando a tensão de fornecimento decresce para um valor menor que 0,1 pu por um período de tempo não superior a 1 minuto (1). Este tipo de interrupção pode ser causado por curto-circuitos no sistema de energia, falhas nos equipamentos e mau funcionamento dos sistemas de controlo. A duração da interrupção devido a uma falha como por exemplo devido a um curto-circuito e determinada pelo tempo de actuação dos dispositivos de protecção.

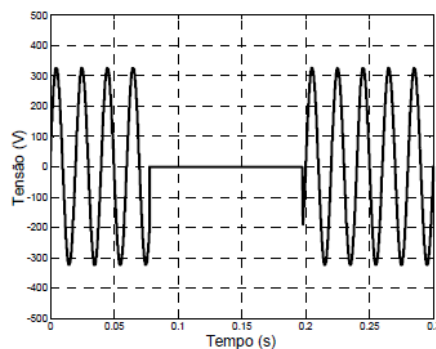


Figura 2.7 - Exemplo da forma de onda de uma interrupção de curta duração



2.3.2.2. Sub-tensões de curta-duração

As sub-tensões de curta duração, também conhecidas como cavas “SAG”, são caracterizadas por uma redução no valor eficaz da tensão, entre 10 a 90 %, do valor nominal a frequência fundamental, num curto intervalo de tempo com duração entre 0,5 ciclos e 1 minuto. Este tipo de distúrbio está associado, principalmente, a falhas nos sistemas de transmissão, a curtos-circuitos ocorridos nas redes de distribuição, mas também pode ser causado pela energização de grandes cargas, pelo arranque de grandes motores e pela corrente de energização de um transformador. Como consequência deste distúrbio, tem-se principalmente uma má operação de equipamentos electrónicos.

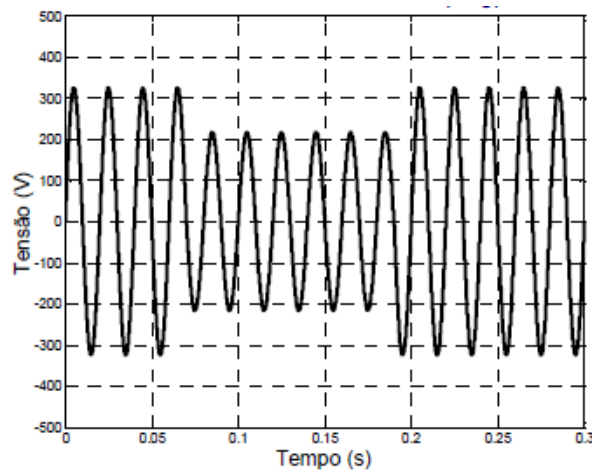


Figura 2.8 - Exemplo da forma de onda de uma Sub-tensões de curta-duração

2.3.2.3. Sobretensão de Curta Duração

A sobretensão de curta duração também conhecida como “Swell”, é definida como um aumento da tensão nominal do sistema que poderá ir de 100 a 180% acima do valor eficaz, considerando-se a frequência do sistema com duração entre 0,5 ciclos a 1 minuto. A sobretensão normalmente ocorre devido a comutação incorrecta de certo tipo de cargas e dispositivos de manobras como interruptores e disjuntores de linha. O desligar de um banco de condensadores pode originar uma sobretensão.

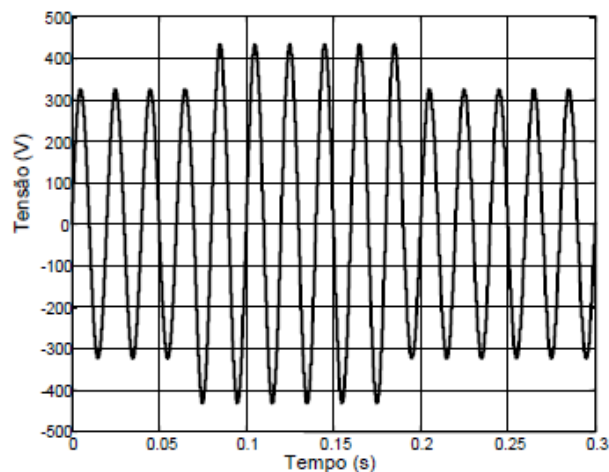


Figura 2.9 - Exemplo da forma de onda de uma Sobretensões de Curta-Duração

2.3.3. Variações de tensão de longa-duração

A diferença que existe entre as variações de tensão de curta duração e de longa duração, está no intervalo de tempo que o fenómeno demora a estabilizar, as variações de tensão de longa duração podem ser caracterizadas como desvios que o correm no valor eficaz da tensão, na frequência do sistema, com duração superior a 1 minuto e são classificadas como: sobretensões, subtensões e interrupções de longa duração.

Considerando que a principal diferença entre as variações de tensão de longa e curta duração está no tempo associado à estabilização do evento, não será necessário duplicar as formas de onda que estão associadas as variações de longa duração.

2.3.4. Desequilíbrios de tensão

Os desequilíbrios podem ser caracterizados usando-se diagramas de sequências, pela relação entre a componente de sequência negativa e a componente de sequência positiva, dos sinais referenciados (1).

As origens destes desequilíbrios geralmente estão nos sistemas de distribuição, que possuem cargas monofásicas distribuídas inadequadamente, causando o surgimento de tensões de sequência negativa. Este problema agrava-se quando os consumidores alimentados de forma trifásica possuem uma má distribuição da carga nos circuitos internos, impondo correntes desequilibradas na rede eléctrica.

Tais factores prejudicam a qualidade no fornecimento de energia, idealizada pela concessionária, e desta forma, alguns consumidores encontram na sua alimentação um desequilíbrio de tensão, a qual se pode manifestar sob três formas distintas:

- Amplitudes diferentes;
- Assimetria nas fases;
- Assimetria conjunta de amplitudes e fases;

Destas, apenas a primeira é frequentemente evidenciada no sistema eléctrico.

2.3.5. Distorções na Forma de onda

A distorção da forma de onda é definida como um desvio, em regime permanente, da forma de onda puramente sinusoidal, na frequência fundamental, e é caracterizada principalmente pelo seu conteúdo espectral, existem cinco tipos principais de distorções da forma de onda (1).

- Nível de Corrente Contínua (CC);
- Harmónicos;
- Inter-harmónicas;
- Ruído electromagnético;
- Micro cortes (Notching);



2.3.5.1. Nível CC

A presença de tensão ou corrente CC num sistema eléctrico CA pode ocorrer como resultado da operação ideal de rectificadores de meia-onda. O nível CC em redes de corrente alternada, pode levar à saturação de transformadores, resultando em perdas adicionais e na redução da vida útil do equipamento. Pode também causar corrosão electrolítica dos eléctrodos de aterramento e de outras ligações (1).

2.3.5.2. Harmónicas

As harmónicas são tensões ou correntes sinusoidais cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental. Juntamente com a tensão ou corrente fundamental, as harmónicas produzem distorção na forma de onda (distorções harmónicas) (1).

A forma de onda de tensão resultante não é sinusoidal, resultando da adição de sinais com diferentes amplitudes e fases e com frequências múltiplas da frequência fundamental, a distorção harmónica existe devido aos equipamentos e cargas com características não lineares instalados no sistema de energia.

O fornecimento de energia a determinados consumidores, que causam deformações no sistema fornecedor, prejudica não apenas o consumidor responsável pelo distúrbio, mas também outros consumidores ligados à mesma rede eléctrica.

As cargas com características não lineares eram pouco utilizadas e os equipamentos eram mais resistentes aos efeitos provocados por distorções harmónicas. Nos últimos anos, com o rápido desenvolvimento da electrónica de potência e a utilização de métodos que procuram o uso mais racional da energia eléctrica, o conteúdo harmónico presente nos sistemas tem aumentado, causando uma série de efeitos indesejáveis em diversos equipamentos ou dispositivos, comprometendo a qualidade e o próprio uso racional da energia eléctrica. O problema é ainda agravado com a utilização de equipamentos e cargas mais sensíveis à Qualidade de Energia.

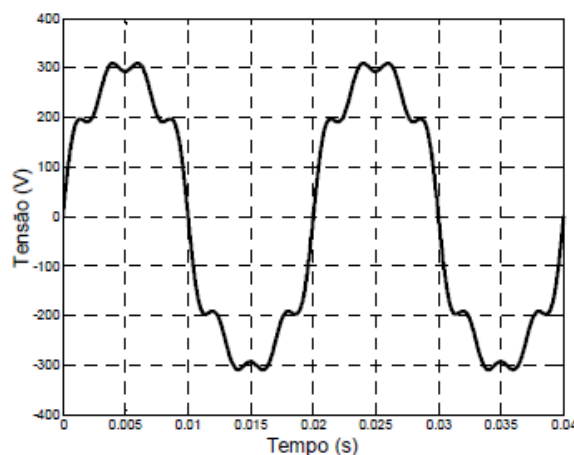


Figura 2.10 - Exemplo da forma de onda com distorção harmónica

2.3.5.3. Inter-harmônicas

Os inter-harmônicos são componentes de frequência, em tensão ou corrente, que não são múltiplos inteiros da frequência fundamental (50 Hz). Estes podem aparecer como frequências discretas ou em toda a banda (1). A distorção inter-harmônica provém muitas vezes de conversores de frequência e encontra-se esta perturbação em quase todas as instalações eléctricas.

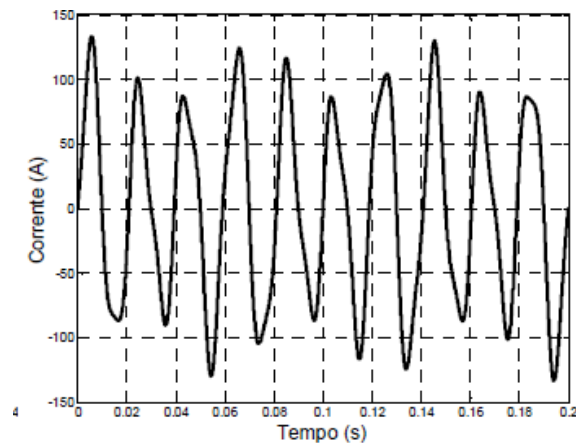


Figura 2.11 - Exemplo da forma de onda na presença de inter-harmônicas

2.3.5.4. Ruídos

Ruído é definido como um sinal eléctrico indesejado que não pode ser classificado como distorção harmónica ou transitório. Contém uma larga faixa espectral com frequências menores que 200 kHz (1), as quais são superpostas às tensões ou correntes de fase, e também podem ser encontrados em condutores de neutro. O ruído é causado por interferências electromagnéticas provocadas por sistemas com feixes hertzianos, microondas, difusão de televisão, soldadura, impressoras a laser, etc. Apesar de ser uma perturbação menos grave, pode ainda causar distúrbios nos equipamentos mais sensíveis e causar erros e perdas de informação em sistemas de processamento de dados.

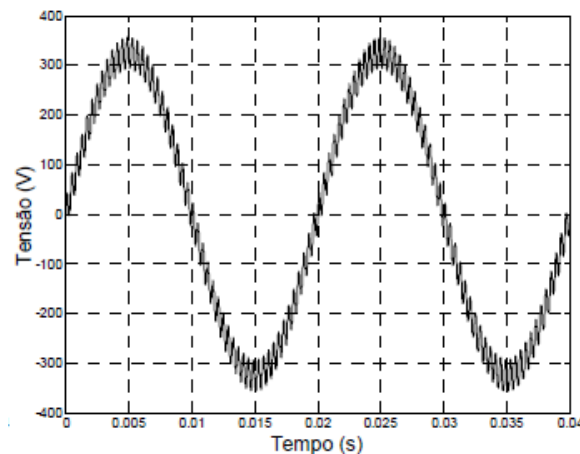


Figura 2.12 - Exemplo da forma de onda na presença de ruído de alta frequência



2.3.5.5. “Notching” ou recorte na tensão

O “Notching” é um distúrbio de tensão causado pela operação normal de equipamentos de electrónica de potência, quando a corrente é comutada de uma fase para outra (1).

Esta perturbação tem elevada frequência associada e de curta duração. Os conversores trifásicos com tensão de saída DC são a causa mais importante de “notching” de tensão.

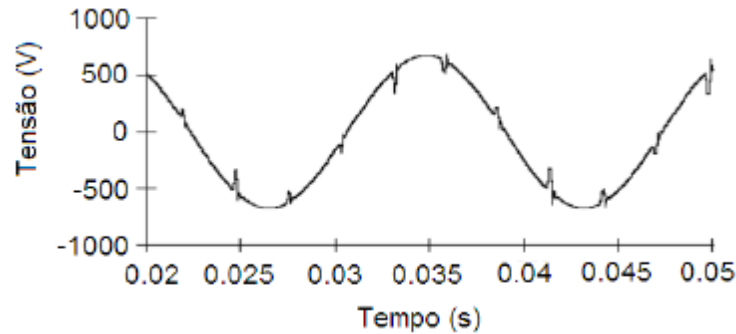


Figura 2.13 - Exemplo da forma de onda na presença “Notching”

2.3.5.6. Tremulação (Fliker)

As tremulações são flutuações do valor da tensão, modulada em amplitude por um sinal com frequência da ordem dos 0 a 30 Hz e com amplitudes de 80% a 90% do valor da tensão nominal. As tremulações têm consequências bastante nefastas sobre todo o tipo de receptores, sendo mais visíveis quando se manifestam no tremular da intensidade luminosa emitida por aparelhos de iluminação incandescente. Fornos de arco, arranque e paragem frequente de motores eléctricos cargas oscilantes, máquinas de soldar, etc., são elementos que podem contribuir para o surgimento de tremulações na tensão. A severidade da tremulação pode ser de dois tipos, curta ou longa.

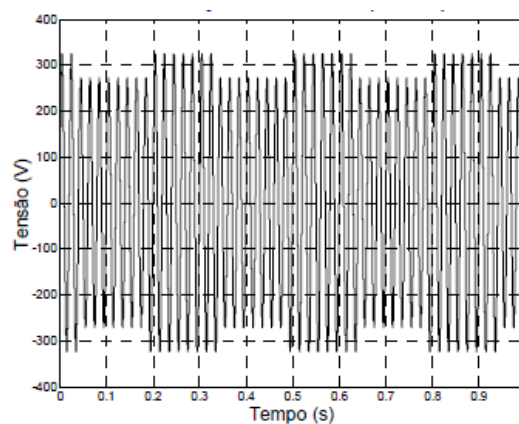


Figura 2.14 - Exemplo da forma de onda na presença de Flutuações de Tensão

O fenómeno *flicker* consiste no efeito mais comum provocado pelas oscilações de tensão. Este tema merece especial atenção, uma vez que o desconforto visual associado à perceptibilidade do olho humano às variações da intensidade luminosa é, em toda a sua extensão, indesejável.

2.4. Factor de Potência

Pretende-se apresentar algumas noções teóricas e fórmulas essenciais ao cálculo das grandezas que constituem os conceitos fundamentais do tema da compensação do Factor de Potência. Existem várias noções sobre potência que embora sendo básicas, são essenciais para a compreensão de conceitos como o factor de potência e a sua respectiva correcção.

2.4.1. Potência Instantânea e Média

Quando um circuito eléctrico linear é alimentado por uma fonte sinusoidal, todas as tensões e correntes desse mesmo circuito são também sinusoidais e com a mesma frequência que a fonte de alimentação.

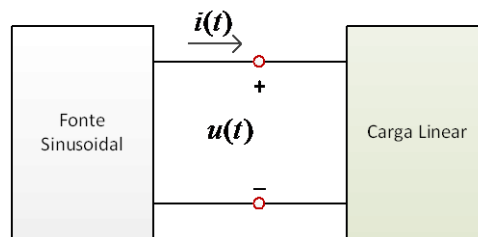


Figura 2.15 - Carga Linear alimentada por Fonte Sinusoidal

A potência instantânea $p(t)$ que vai ser absorvida pela carga é o produto da tensão instantânea $u(t)$ que é aplicada e a corrente instantânea $i(t)$ que o percorre.

$$p(t) = u(t).i(t) \quad (2.1)$$

A potência instantânea é expressa em watts (W), é a potência medida em qualquer instante de tempo, que define se a carga absorve energia ($p > 0$) ou devolve energia para a fonte ($p < 0$)

Considerando o caso geral da potência instantânea absorvida por uma combinação arbitrária de elementos do circuito alimentados por uma tensão sinusoidal, a tensão e corrente aos terminais, a tensão e corrente será,

$$u(t) = U_m \cos(\omega t + \theta_u) \quad (2.2)$$

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \theta_i) \quad (2.3)$$

Onde U_m e I_m são as amplitudes (ou valores de pico) e θ_u e θ_i são os ângulos de fase da tensão e da corrente, respectivamente. A expressão da potência instantânea fornecida à carga é dada por,

$$p(t) = u(t).i(t) = U_m.I_m \cos(\omega t + \theta_u) \cos(\omega t + \theta_i) \quad (2.4)$$

Aplicando a seguinte regra trigonométrica,

$$\cos(A).\cos(B) = \frac{1}{2}[\cos(A-B) + \cos(A+B)] \quad (2.5)$$



Resulta a seguinte equação,

$$p(t) = \frac{1}{2} U_m \cdot I_m \cdot \cos(\theta_U - \theta_I) + \frac{1}{2} U_m \cdot I_m \cdot \cos(2\omega t + \theta_U + \theta_I) \quad (2.6)$$

Podemos reescrever a expressão da potência instantânea da seguinte forma,

$$p(t) = \frac{1}{2} U_m \cdot I_m \cdot \left\{ \cos(\theta_U - \theta_I) + \cos[2(\omega t + \theta_U) - (\theta_U + \theta_I)] \right\} \quad (2.7)$$

De acordo com o resultado da equação (2.7), verifica-se que a potência instantânea é constituída por duas partes, uma primeira que é constante (independente do tempo), o seu valor depende da diferença de fase entre a tensão e a corrente. E uma segunda parte uma função sinusoidal co-seno, com o dobro da frequência angular da tensão ou corrente (2ω).

O valor médio de uma forma de onda periódica sinusoidal pode ser calculado pela integração da sua função durante um período completo, e dividindo o resultado pelo mesmo período, assim sendo a potência média é dada por,

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot dt \quad (2.8)$$

Substituindo o resultado da equação (2.7) na equação (2.8) fica,

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} U_m \cdot I_m \cdot \left\{ \cos(\theta_U - \theta_I) + \cos[2(\omega t + \theta_U) - (\theta_U + \theta_I)] \right\} \quad (2.9)$$

Dividindo a equação em duas partes fica,

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} U_m \cdot I_m \cdot \cos(\theta_U - \theta_I) \cdot dt + \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} U_m \cdot I_m \cdot \cos(2\omega t + \theta_U + \theta_I) \cdot dt \quad (2.10)$$

Como já foi dito anteriormente o primeiro termo é independente de (t) e por isso representa uma integração de uma constante, integrando uma constante durante um período e dividindo esse valor pelo seu respectivo período, simplesmente resulta no próprio valor da constante.

O segundo termo representa uma forma de onda cosendo e como e sabido o valor médio durante um período é zero, pois as áreas são iguais durante o semi-ciclo positivo e negativo, sendo assim o segundo termo desaparece ficando equação final da seguinte forma,

$$P = \frac{1}{2} U_m \cdot I_m \cdot \cos(\theta_U - \theta_I) \quad (2.11)$$

Uma vez que $\cos(-\theta) = \cos(\theta)$, o argumento da função co-seno pode ser $(\theta_U - \theta_I)$ ou $(\theta_I - \theta_U)$, a expressão representa a diferença de fases entre a tensão e a corrente.

2.4.2. Valor Eficaz ou RMS (Root Mean Square)

O valor eficaz surge da necessidade de medição da tensão ou da corrente que efectivamente é fornecida pela fonte a uma carga resistiva. O valor eficaz de uma corrente sinusoidal é a potência média que em corrente contínua seria fornecida a essa mesma carga durante um período.

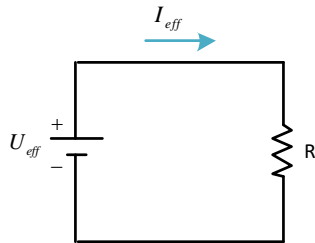


Figura 2.16 – Circuito DC

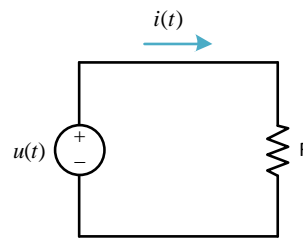


Figura 2.17 – Circuito AC

Tendo em conta dois os circuitos, uma alimentado por uma fonte DC onde a potencia absorvida é R^2I , e outro uma fonte AC sinusoidal com uma potencia média $1/2 \cdot I_M^2 R$, o objectivo é encontrar o valor de I_{eff} que vai transferir a mesma potencia eficaz a resistência R no circuito AC.

A potência média absorvida pela resistência R no circuito AC é:

$$P = \frac{1}{2} \int_0^T i^2 \cdot R \cdot dt = \frac{R}{T} \int_0^T i^2 \cdot dt \quad (2.12)$$

Enquanto a potência absorvida pela resistência no circuito C.C é:

$$P = I_{\text{ef}}^2 \cdot R \quad (2.13)$$

Igualando as expressões das equações e resolvendo em ordem a I_{eff} obtemos :

$$I_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 \cdot dt} \quad (2.14)$$

O valor eficaz da tensão é encontrado, da mesma forma como a corrente; isto é:

$$U_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 \cdot dt} \quad (2.15)$$



Isto indica que o valor eficaz matematicamente é definido como o quadrado da média e posteriormente a sua raiz, frequentemente conhecido como o valor *rms* (root-mean-square).

$$I_{ef} = I_{RMS} \quad U_{ef} = U_{RMS} \quad (2.16)$$

Para qualquer função periódica $x(t)$ em geral, o valor *rms* é dado por

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 \cdot dt} \quad (2.17)$$

De acordo com a equação (2.17) o valor *rms* de $x(t)$ é calculado determinando o quadrado de x (x^2), e depois a sua média:

$$\frac{1}{T} \int_0^T x^2 \cdot dt \quad (2.18)$$

Posteriormente a raiz quadrada ($\sqrt{\quad}$) da média, o valor rms de uma constante é a própria constante, para uma sinusóide $i(t) = I_m \cos(\omega t)$ o seu valor eficaz ou rms é :

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \cdot \cos^2 \omega t \cdot dt} = \sqrt{\frac{I_m^2}{T} \int_0^T \frac{1}{2} (1 + \cos 2\omega t) \cdot dt} \quad (2.19)$$

O integral de $\cos 2\omega t$ é zero durante o período T , a equação (2.19) fica,

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (2.20)$$

Da mesma forma que para $u(t) = U_m \cos(\omega t)$ fica,

$$U_{rms} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (2.21)$$

No entanto as equações (2.20) e (2.21) são validas apenas para sinais sinusoidais, A potência média da equação (2.11) pode ser escrita em termos dos valores *rms*.

$$P = \frac{1}{2} \cdot U_m \cdot I_m \cdot \cos(\theta_U - \theta_I) = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot \cos(\theta_U - \theta_I) = U_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos(\theta_U - \theta_I) \quad (2.22)$$

Do mesmo modo, a potência média absorvida por uma resistência R pode ser escrita como,

$$P = I_{rms}^2 \cdot R = \frac{U_{rms}^2}{R} \quad (2.23)$$

2.4.3. Potência Aparente e Factor de Potência

Como foi referido anteriormente a tensão e a corrente aos terminais de um circuito é:

$$v(t) = U_m \cos(\omega t + \theta_u) \quad e \quad i(t) = I_m \cos(\omega t + \theta_i) \quad (2.24)$$

Ou, na forma fasorial,

$$\bar{U} = U_m \underline{\theta_u} \quad e \quad \bar{I} = I_m \underline{\theta_i} \quad (2.25)$$

A potência média é

$$P = \frac{1}{2} U_m I_m \cos(\theta_u - \theta_i) \quad (2.26)$$

Em valores rms,

$$P = U_{rms} I_{rms} \cos(\theta_u - \theta_i) = S \cos(\theta_u - \theta_i) \quad (2.27)$$

A potência média é um produto de dois termos. O produto $V_{rms} \cdot I_{rms}$ é conhecido como a Potência Aparente S (em VA). O factor $\cos(\theta_u - \theta_i)$ é chamado de factor de potência (PF)

$$S = U_{rms} I_{rms} \quad (2.28)$$

O Factor de potência caracteriza a relação entre as potência totais activa e aparente.

$$PF = \frac{P}{S} = \cos(\theta_u - \theta_i) \quad (2.29)$$

O factor de potência pode ser visto como esse factor pelo qual a potência aparente deve ser multiplicada para obter o potência real ou média. O valor de PF varia entre zero e a unidade.

Para uma carga puramente resistiva, a tensão e a corrente estão em fase, de forma a que $\theta_u - \theta_i = 0$ e $PF = 1$ Isto para que signifique que a potência aparente é igual à potência média. Para uma carga puramente reactiva, $\theta_u - \theta_i = \pm 90^\circ$ e $PF = 0$ neste caso, a potência média é zero. De entre estes dois casos extremos, PF é indutivo ou capacitivo.

Quando se diz que o factor de potencia está em avanço significa que a corrente esta em avanço em relação tensão, o que implica uma carga capacitiva. O quando o factor de potencia em atraso significa que a corrente está atrasada em relação a tensão, implicando uma carga indutiva.



2.4.4. Potência Complexa

A potência complexa assume um papel muito importante na análise do tipo de energia que alimenta uma dada carga. Dada na forma de fasorial $U_m \angle \theta_U$ e $I_m \angle \theta_i$, respectivamente a tensão $u(t)$ e a corrente $i(t)$, a potência complexa S absorvida pela carga AC é o produto dos valores complexos de tensão e o conjugado da corrente, ou:

$$\bar{S} = \frac{1}{2} \bar{U} \bar{I}^* \quad (2.30)$$

Assumindo o módulo da equação anterior têm-se a potência aparente,

$$S = U_{rms} \cdot I_{rms}^* \quad (2.31)$$

Onde:

$$U_{rms} = \frac{U}{\sqrt{2}} = U_{rms} \angle \theta_u \quad (2.32)$$

E

$$I_{rms} = \frac{I}{\sqrt{2}} = I_{rms} \angle \theta_i \quad (2.33)$$

Assim, podemos escrever a equação (2.31) como,

$$S = U_{rms} \cdot I_{rms} \angle \theta_u - \theta_i = U_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos(\theta_u - \theta_i) + j U_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \sin(\theta_u - \theta_i) \quad (2.34)$$

A magnitude da potência complexa é a potência aparente; assim, a potência complexa é medido em volt-ampères (VA). Além disso, verificamos que o ângulo da potência complexa é o ângulo de factor de potência. A potência complexa pode ser expressa em termos da carga de impedância Z .

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{U_{rms}}{I_{rms}} = \frac{U_{rms}}{I_{rms}} \angle \theta_u - \theta_i \quad (2.35)$$

Substituindo a expressão $U_{rms} = Z \cdot I_{rms}$ na equação (2.31),

$$S = I_{rms}^2 \cdot Z = \frac{U_{rms}^2}{Z^*} = U_{rms} \cdot I_{rms}^* \quad (2.36)$$

Verifica-se que a potência complexa (VA) é o produto do fasor rms da tensão e o conjugado complexo do fasor de corrente rms.

Considerando que $Z = R + jX$ a equação (2.36) fica,

$$S = I_{rms}^2 \cdot (R + jX) = P + jQ \quad (2.37)$$

Onde P e Q são as partes reais e imaginárias da potência complexa que é,

$$\begin{aligned} P &= \text{Re}(S) = I_{rms}^2 \cdot R \\ Q &= \text{Im}(S) = I_{rms}^2 \cdot X \end{aligned} \quad (2.38)$$

Sendo P a potência média ou activa, depende da parte resistiva (R) da carga, e Q depende da reactância X da carga e é chamado de potência reactiva (ou de quadratura).

Comparando a equação (2.32) com a equação (2.37) verifica-se a seguinte relação:

$$\begin{aligned} P &= U_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos(\theta_U - \theta_I) \\ Q &= U_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \sin(\theta_U - \theta_I) \end{aligned} \quad (2.39)$$

A potência activa é medida em (W) Watts, e a potência média que é entregue a carga, representa a energia útil, a potência real dissipada pela carga.

A potência reactiva Q é uma medida da troca de energia entre a fonte e a parte reactiva da carga. A unidade do Q é o volt-ampère reactivo (VAR).

Os elementos de armazenamento de energia e não desperdiçam nem consomem energia, mas vão efectuar uma troca de energia para de trás e para a frente com o resto do Rede. Da mesma forma, a potência reactiva é transferida para a frente e para trás entre a carga e a fonte, representando um intercâmbio sem perdas entre a carga e a fonte que:

Para cargas resistivas	Tensão em fase com a corrente	$\theta = 0$	$Q = 0$	Factor de potência unitário
Para cargas capacitivas	Tensão em atraso em relação a corrente	$\theta > 0$	$Q < 0$	Factor de potência capacitivo
Para cargas indutivas	Tensão em avanço em relação a corrente	$\theta < 0$	$Q > 0$	Factor de potência Indutivo

Tabela 1 – Tipo de carga e respectivo factor de potência



A introdução a potência complexa permite obter as potências activa e reactiva directamente a partir dos fasores de corrente e tensão.

Potência Complexa	$S = P + jQ = U_{rms} \cdot (I_{rms})^* = U_{rms} \cdot I_{rms} \cdot e^{j(\theta_u - \theta_i)}$
Potência Aparente	$S = S = U_{rms} \cdot I_{rms} = \sqrt{P^2 + Q^2}$
Potencia Activa	$P = \text{Re}(S) = S \cdot \cos(\theta_u - \theta_i)$
Potencia Reactiva	$Q = \text{Im}(S) = S \cdot \sin(\theta_u - \theta_i)$
Factor de Potência	$\frac{P}{S} = \cos(\theta_u - \theta_i)$

Tabela 2 – Resumo das Potências associadas ao Factor de Potência

A potência complexa contém toda a informação relevante da energia consumida por uma carga, é prática comum representar S,P e Q na forma de um triângulo, conhecido como o triângulo das potências, como e mostrado na figura 2.18

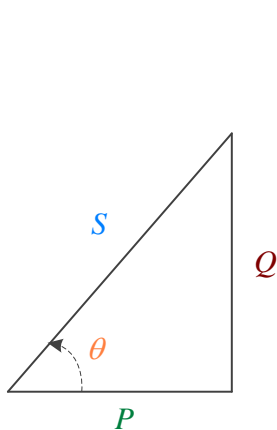


Figura 2.18 - Triângulo das potências

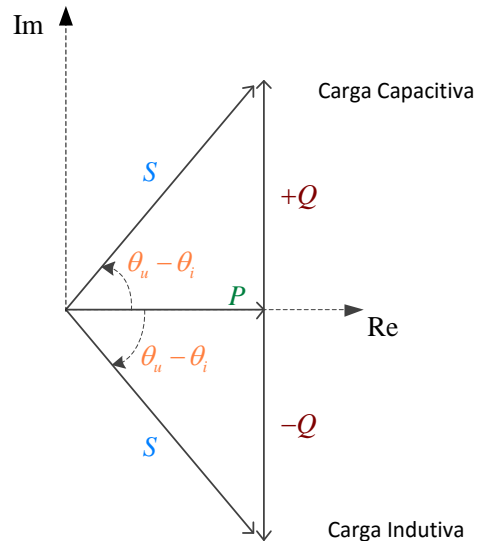


Figura 2.19 – Carga Indutiva/Capacitiva

Quando S está no primeiro quadrante, temos uma carga indutiva e um PF em atraso, quando S está no quarto quadrante a carga é capacitiva e o PF está em avanço.

2.4.5. Correção do factor Potência.

A maioria das cargas domésticas (como, por exemplo, máquinas de lavar, maquinas de ar condicionado e frigoríficos) e cargas industriais (tais como motores de indução) são cargas indutivas e operaram com um baixo factor de potência. Embora o carácter indutivo da carga não possa ser mudado, pode-se aumentar o seu factor de potência.

O processo de aumento do factor de potência sem alterar a tensão ou corrente à carga inicial é conhecido como correção de factor de potência.

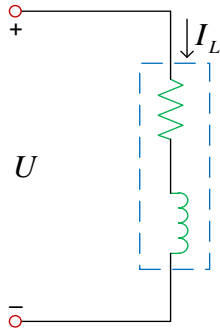


Figura 2.20 - Carga Indutiva

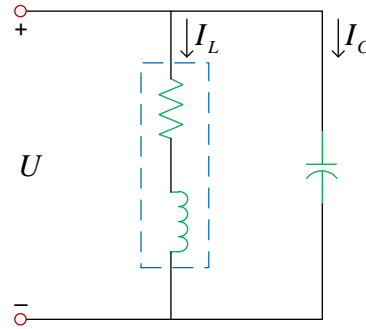


Figura 2.21 – Carga Compensada

Dado o circuito da figura 2.20 que representa uma carga indutiva, o factor de potência da carga pode ser melhorado ou corrigido por deliberadamente instalando um condensador em paralelo com a carga, conforme mostrado na figura 2.21.

O efeito da adição do condensador pode ser ilustrado através do triângulo de potências ou o diagrama de fasores das correntes envolvidas na figura 2.22. O circuito representado na figura 2.20 apresenta um factor de potência com um $\cos(\theta_1)$ com a introdução de um condensador o circuito da figura 2.21 apresenta um factor de potencia $\cos(\theta_2)$.

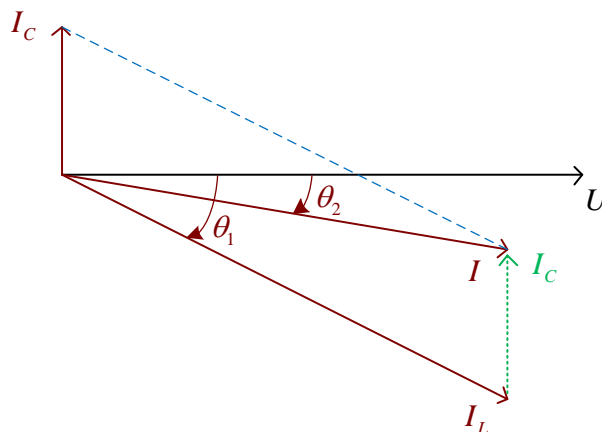


Figura 2.22 – Diagrama das correntes e tensões na compensação de uma carga indutiva



É possível verificar que ao adicionar o condensador o ângulo do desfasamento entre a tensão fornecida U e a corrente total I vai ser reduzido de θ_1 para θ_2 aumentando o factor de potência. Para a mesma tensão U depois da compensação, a corrente I apresenta um valor mais reduzido quando comparado com a corrente I_L permitindo obter menores custos a nível da facturação. Sendo $P = I_L^2 R$, um aumento do consumo traduz-se num aumento das perdas de potência. Portanto, é benéfico tanto para a empresa fornecedora de energia como para o consumidor que seja feita a correcção do factor de potência.

Podemos olhar para a correcção do factor de potência de uma outra perspectiva. Considere o triângulo de potência na figura 2.23.

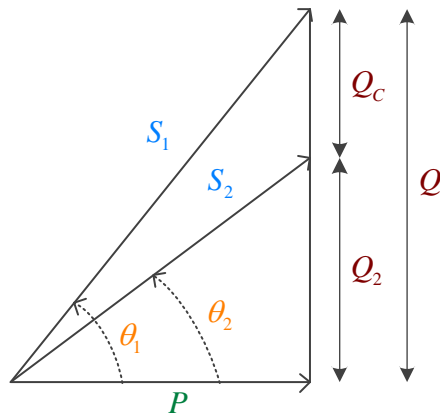


Figura 2.23 – Triângulo das Potências

$$P = S_1 \cdot \cos \theta_1 \quad (2.40)$$

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin \theta_1 = P \cdot \tan \theta_1 \quad (2.41)$$

Se temos o desejo de aumentar o factor de potência de $\cos(\theta_1)$ a $\cos(\theta_2)$ sem alterar a potência real ($P = S_2 \cdot \cos \theta_2$), então a nova potência reactiva é:

$$Q_2 = P \cdot \tan \theta_2 \quad (2.42)$$

A redução da potência reactiva é causada pelo condensador em paralelo que é:

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P \cdot (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (2.43)$$

Mas $Q_c = U_{rms}^2 / X_c = \omega C U_{rms}^2$ o valor da capacitância shunt necessária C é determinada da seguinte forma:

$$C = \frac{Q_c}{\omega U_{rms}^2} = \frac{P \cdot (\tan \theta_1 - \tan \theta_2)}{\omega U_{rms}^2} \quad (2.44)$$

2.5. Normas da Qualidade de Energia

2.5.1. Requisitos Principais da Norma EN 50160

A normalização existe em diversos países, e tem como objectivos: a definição das condições de funcionamento normais e variações admissíveis; a definição de terminologia, para a eficaz comunicação, medição e monitorização, etc; a limitação de perturbações na rede eléctrica, no fornecimento de energia eléctrica, bem como no consumo.

Na norma EN 50160 estão descritos os parâmetros principais de tensão e a margem de erro para cada um desses parâmetros, do ponto de vista do fornecedor da energia eléctrica para sistemas de distribuição em BT e em MT em condições normais de funcionamento, na tabela 3 e tabela 4, estão indicados alguns parâmetros desta norma.

Tabela 3 - Requisitos Principais da Norma EN 50160

Parâmetros	Características de tensão de acordo com a norma EN 50160
Frequência	BT, MT: valor médio da fundamental medido durante 10 s • $\pm 1\%$ (49,5 - 50,5 Hz) para 99,5 % da semana • $-6\% / +4\%$ (47 - 52 Hz) para 100% da semana
Variações de amplitude da tensão	BT, MT: $\pm 10\%$ para 95 % da semana
Variações rápidas de tensão	• BT: 5 % normal 10 % raramente PLT ≤ 1 para 95 % da semana • MT: 4 % normal 6 % raramente PLT ≤ 1 para 95 % da semana
Cavas	Maioria com duração < 1 s. Cavas locais dadas pela comutação de cargas: BT: 10 – 50% , MT: 10 - 15%
Interrupção de curta duração	BT, MT: (até 3 min.) dezenas a centenas por ano; duração de 1s em 70 % dos casos
Interrupção de longa duração	BT, MT: (mais de 3 min.) 10 a 50 por ano
Sobretensões temporárias	BT: $< 1,5$ kV <i>rms</i> MT: $1,7 * U_n$ (tensão nominal) $2,0 * U_n$ (tensão nominal)
Sobretensões transitórias	BT: geralmente inferior a 6 kV; Tempo de subida: ms - μ s MT: não definido
Desequilíbrio	BT, MT: superior a 2 % para 95 % da semana; até 3 % em alguns locais
Harmónicas	BT, MT: ver Tabela 2

**Tabela 4 - Valor individual das tensões harmónicas dadas em percentagem da tensão nominal do sistema**

Harmónicas Ímpares				Harmónicas Pares	
Não múltiplas de 3		Múltiplas de 3			
Ordem h	Tensão relativa (%)	Ordem h	Tensão relativa (%)	Ordem h	Tensão relativa (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3	21	0,5	-	-
17	2	-	-	-	-
19	1,5	-	-	-	-
23	1,5	-	-	-	-
25	1,5	-	-	-	-

A norma EN 50160 deve ser compreendida como sendo um compromisso entre o fornecedor de energia e o consumidor, tendo como vantagem a definição dos parâmetros característicos da tensão da rede eléctrica que define os parâmetros da Qualidade de Energia.

2.5.2. Norma IEC 60950-1 (Descarga de Condensadores em equipamentos)

A utilização de condensadores em equipamentos obriga a determinadas regras de segurança, os equipamentos devem ser concebidos para que nos pontos de desconexão da fonte de alimentação o risco de choque eléctrico devido a carga armazenada em condensadores seja reduzido. Para tal a tensão aos terminais dos condensadores deverá ser inferior a 60V dc após 10 segundos de se ter desligado o equipamento.

3. Equipamento para Compensação da Energia Reactiva

3.1. Introdução

Desde o começo da expansão das redes eléctricas de energia, apareceram inúmeros dispositivos com o objectivo de compensar a energia reactiva nas linhas de transmissão. Inicialmente estes métodos eram essencialmente baseados em dispositivos electromecânicos. Com o evoluir da tecnologia verificaram-se enormes progressos nesta área com o surgimento e evolução da electrónica de potência e conseqüente aparecimento dos dispositivos FACTS.

Neste capítulo é feita a apresentação dos tipos de compensação existentes, assim como os equipamentos usados para compensação de potência reactiva, sua constituição e princípio de funcionamento.

Na Figura 3.1 encontra-se representado um diagrama de blocos de um equipamento de compensação da energia reactiva em paralelo com a rede eléctrica e a carga, o sistema de compensação injecta uma corrente de compensação que vai ser subtraída a corrente da carga, de tal forma que a origina uma corrente em fase com a tensão da rede.

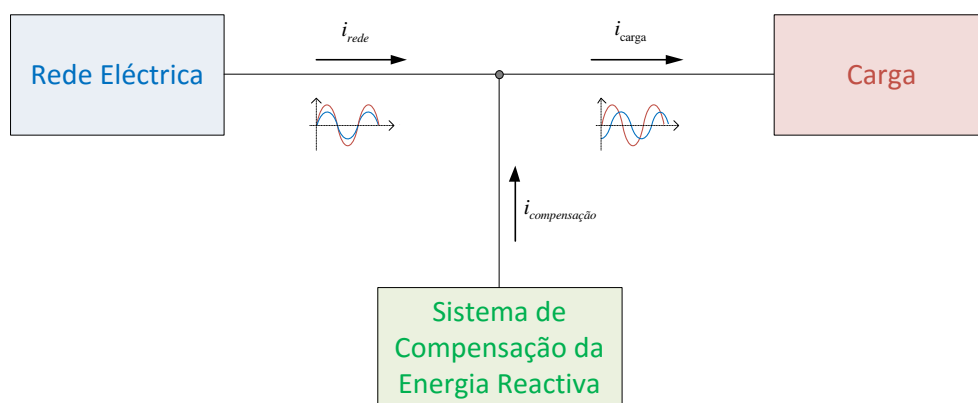


Figura 3.1 – Diagrama de Blocos da Compensação da Energia Reactiva



3.2. Tipos de Compensação

Há poucas configurações possíveis de sistemas de compensação, no entanto existem alguns métodos básicos que podemos distinguir.

3.2.1. Compensação individual

Este tipo de compensação têm como princípio efectuar a ligação dos condensadores aos terminais do equipamento cujo o factor de potência se pretende corrigir, a compensação é realizada localmente e exclusivamente no equipamento a ser compensado

Do ponto de vista técnico apresenta as seguintes vantagens:

- Redução das perdas energéticas na instalação, tendo como consequência a diminuição dos encargos energéticos;
- Permite uma maior potência disponível nos transformadores e cabos;
- Melhora os níveis de tensão na instalação;

Relativamente as desvantagem é possível referir as seguintes:

- A compensação local e exclusiva vai ter maior despesas de instalação que as outras opções;
- É difícil ajustar a potência de compensação de qualquer equipamento para as potências normalmente disponíveis no mercado;
- O condensador não será utilizado quando o dispositivo se encontrar desligado, além disso as necessidades da carga nem sempre são cumpridas pela oferta de condensadores dos fornecedores;

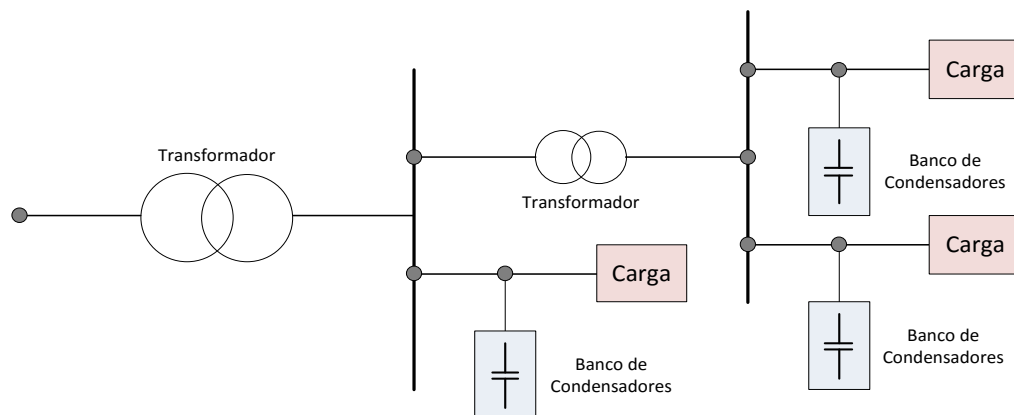


Figura 3.2 - Exemplo de uma rede com Compensação Individual

3.2.2. Compensação Parcial por Grupos de Cargas

A bateria de condensadores é instalada de forma a compensar um sector, ou um conjunto de máquinas. É colocada junto ao quadro parcial que alimenta esses receptores. A potência necessária será menor que no caso da compensação individual, o que torna a instalação mais económica.

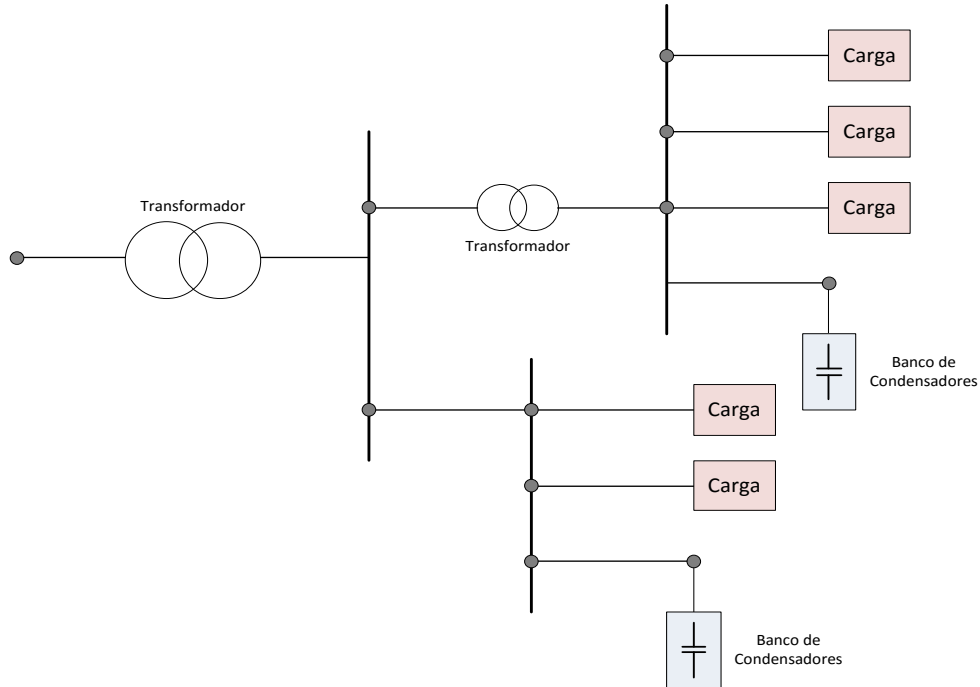


Figura 3.3 - Exemplo de Rede com Compensação Parcial por Grupo de Cargas

3.2.3. Compensação Centralizada

A bateria de condensadores é instalada à saída do transformador se a instalação for alimentada em MT ou do Quadro Geral se a instalação for alimentada em BT. Utiliza-se em grandes instalações eléctricas, com um grande número de receptores de potências diferentes e regimes de utilização pouco uniformes. Isto é particularmente vantajoso quando a instalação eléctrica for constituída por diversas cargas com diferentes potências e períodos de operação.

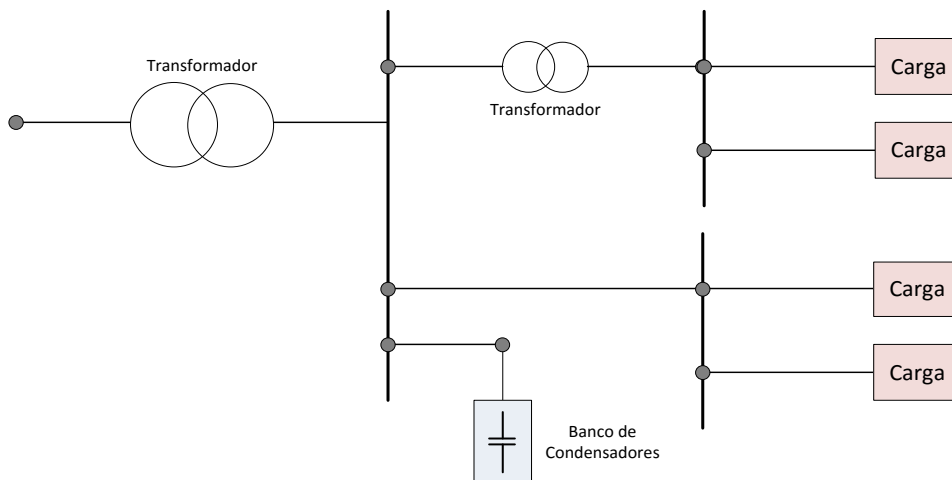


Figura 3.4 - Exemplo de Rede com Compensação Centralizada



Uma compensação centralizada possui ainda as seguintes vantagens:

- As baterias de condensadores, por estarem centralizadas, podem ser controladas mais facilmente;
- Ampliações futuras tornam-se mais simples;
- A potência dos condensadores pode ser adaptada constantemente por aumento da potência da instalação eléctrica;

Este método apresenta as seguintes desvantagens:

- Maiores perdas na rede a jusante do local de instalação da bateria;
- Maior probabilidade de avaria nos equipamentos sensíveis da rede (PCs, autómatos, VEV, etc.) devido a cavas de tensão e sobretensões provocadas pela comutação (ligar ou desligar) de escalões de elevada potência reactiva;

3.2.4. Compensação Combinada

Tal como o nome sugere, é uma compensação que combina dois dos três tipos de compensação individual, por grupos e centralizada.

3.2.5. Compensação com regulação automática

Nas formas de compensação geral e por grupos atrás referidas, é usual utilizar-se uma solução em que os condensadores são agrupados por escalões controláveis individualmente. Um relé varimétrico, sensível às variações de energia reactiva, comanda automaticamente a ligação dos condensadores necessários à obtenção do factor de potência desejado. Obtém-se desde modo uma adaptação imediata da compensação às variações de carga.

3.3. Dispositivos de compensação antes do surgimento dos dispositivos FACTS

Antes do surgimento dos dispositivos FACTS, a compensação em série não era muito empregue e a compensação do ângulo de fase era feita recorrendo a transformadores desfasadores com tomadas electromecânicas.

A compensação em paralelo recorrendo a bancos de condensadores (empregues pela primeira vez em 1914) e a reactâncias fixas, não consegue acompanhar as variações dinâmicas do sistema apesar de conferir alguma correcção nas características do sistema, possuindo portanto uma grande limitação.

Surgiram então outros dispositivos, designados por MSR (“Mechanical switching of shunt reactor”) e por MSC (“Mechanical switching of shunt capacitors”), baseados em bancos de condensadores e de reactâncias mecanicamente ajustáveis que se mostraram mais versáteis que os seus homólogos fixos. No entanto a solução mais empregue durante mais de 50 anos (antes da década de 1960) foi o Condensador Síncrono, juntando-se mais tarde a ele o compensador SR (“Saturated Reactor”).

3.3.1. Dispositivos MSR (Mechanical switching of shunt reactor) e MSC (Mechanical switching of shunt capacitors)

O MSR e o MSC consistem em bancos de reactâncias (indutâncias e condensadores respectivamente) que são inseridos ou removidos da rede por interruptores mecânicos.

Estes dispositivos apesar de conseguirem limitar satisfatoriamente a ocorrência de sobretensões e sub-tensões, não são rápidos o suficiente para influenciar dinamicamente a relação potência-ângulo .

Por outro lado, a comutação destes dispositivos (inserção ou remoção da rede), para além de ser pouco confiável , origina transitórios de tensão que se propagam pela rede e que podem trazer problemas de isolamento.

Também podem causar afluências súbitas de correntes que se propagam pela rede. Devido às componentes de alta frequência contidas nas variações bruscas de corrente, pode ocorrer fadiga mecânica nos equipamentos, produção de harmónicos, produção de sobretensões em resposta à variação brusca da corrente, indução de transitórios indesejáveis em circuitos vizinhos, sendo mais vulneráveis circuitos de baixa potência e de controlo.



3.3.2. Condensador Síncrono

Um Condensador Síncrono é constituído por um gerado síncrono ligado em paralelo com a rede, destinado apenas ao processo de absorção ou injeção de energia reactiva da rede, consegue-se efectuar uma compensação continua regulando a excitação da própria maquina que consoante se é sobre-excitada ou sub-excitada, fornece ou absorve energia, possuindo uma grande capacidade temporária de sobrecarga.

A única potência activa que absorve é a necessária para cobrir as suas perdas

Possuem custos de operação e manutenção consideráveis e por consequência apresentam um menor tempo de vida útil.

Apresentam perdas energéticas superiores aos dispositivos FACTS.

Necessitam de uma aparelhagem de controlo e protecção considerável, assim como uma estrutura de fixação para o seu funcionamento.

Não conseguem ser regulados suficientemente rápido para compensar as perdas súbitas de carga.

Neste aspecto, a utilização de dispositivos FACTS é bastante mais vantajosa, o que levou ao começo da substituição de muitos condensadores síncronos quando os primeiros dispositivos SVC comutados por tirístores ficaram disponíveis.

Os condensadores síncronos praticamente não produzem harmónicos possuem boa resposta contra fenómenos transitórios podendo trocar por tempo limitado energia activa com a rede (armazenada como energia cinética) ,possuem melhor resposta contra defeitos severos (como curto-circuitos trifásicos) e trazem a tensão para os valores nominais mais rapidamente que os dispositivos FACTS mais comuns.

No entanto, para defeitos que levam a quedas de tensão pequenas ou moderadas no sistema, os dispositivos FACTS apresentam melhor desempenho. Na Figura 3.5 está representado um gráfico que mostra a relação entre a corrente do estator e a corrente de campo do condensador síncrono.

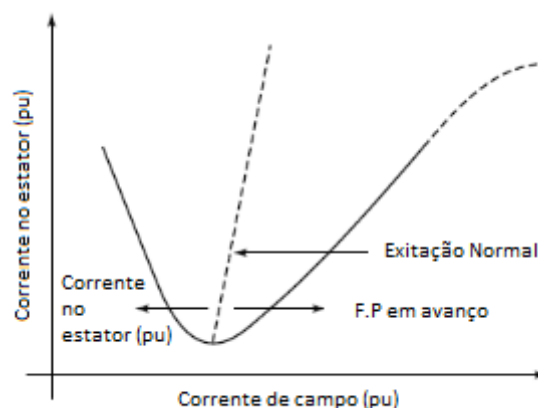


Figura 3.5 - A relação entre a corrente do estator e corrente de campo no condensador síncrono.

3.3.3. Reactâncias Saturadas

Os dispositivos baseados em reactâncias saturadas são baseados numa reactância indutiva com um núcleo de ferro saturado. Na sua forma mais simples pode ser apresentado como um indutor com um núcleo de ferro e com um enrolamento por fase.

A propriedade deste tipo de compensadores consiste na sua capacidade inerente de responder rapidamente ao sistema mantendo uma tensão aproximadamente constante nos seus terminais (com uma variação de 10% sensivelmente), sem qualquer sistema de controlo por realimentação.

Consegue suportar elevadas cargas de corrente com pequenas variações de tensão aos seus terminais devido à saturação magnética do ferro, que possui uma elevada permeabilidade magnética.

No entanto a sua corrente possui componentes harmónicas consideráveis porque um SR funciona numa zona não linear da curva de magnetização do ferro (zona de saturação). Tal problema pode ser minimizado mediante uma ligação apropriada das reactâncias, mas a ocorrência de curto-circuitos afecta o cancelamento das componentes harmónicas.

A estabilidade da tensão aos seus terminais pode ser melhorada colocando um condensador em série, e a associação de um condensador comutável (com os eventuais filtros de harmónicos residuais) em paralelo confere-lhe a capacidade de fornecer energia reactiva ao sistema. Este sistema passa a ser denominado por “Static Var System”, ou SVS na forma abreviada .

Desenvolvimento dos tirístores tem anulado a utilização dos SR desde a década de 1980 porque os dispositivos baseados em tirístores tornaram-se mais baratos, têm menos perdas e permitem o controlo directo da corrente.

Por ser um equipamento não linear, o reactor a núcleo saturado produz harmónicas de corrente, que em determinados sistemas, podem afectar a qualidade do produto, porém, as bobinas que compõem o núcleo magnético podem ser arrançadas de várias formas, fazendo uma compensação destas harmónicas pelo próprio equipamento, e conseqüentemente, uma melhoria do seu funcionamento.

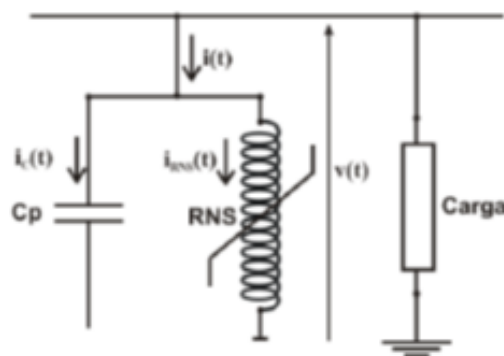


Figura 3.6 – Reactância Saturada



3.4. Dispositivos FACTS

Com o desenvolvimento da electrónica de potência, foram surgindo novos dispositivos semicondutores, cujo funcionamento passou a permitir a operação com grandes tensões de bloqueio da ordem dos kV e com correntes de condução nas centenas de kA, assim como tempos de actuação bastante reduzidos. Devido as características de operação surgiram métodos mais rápidos de controlo e comutação, tornando este tipo de sistemas mais eficientes e económicos na utilização de energia.

Os FACTS (“Flexible AC Transmission Systems”) podem ser definidos como uma série de equipamentos que utilizam a electrónica de potência e que permitem obter um sistema mais eficaz e flexível, com uma maior capacidade de controlo e capacidade de transmissão de potência. Entende-se flexibilidade como a capacidade de rápida e continua alteração dos parâmetros (nível de tensão, impedâncias de transferência e ângulo de transmissão) que controlam a dinâmica de funcionamento de um sistema eléctrico.

Actualmente este tipo de solução apresenta-se como uma vantagem na resolução dos diversos problemas criados nos sistemas de energia eléctrica, levando a que soluções como as electromecânicas tradicionais fossem substituídas devido as suas desvantagens perante este novo método.

De entre as vantagens dos dispositivos FACTS, é possível destacar as seguintes:

- Regulação de tensão;
- Redução de perdas na transmissão;
- Aumento da capacidade de transmissão;
- Aumento dos limites de estabilidade transitória;
- Amortecimento de oscilações;

Devido ao desenvolvimento dos dispositivos de electrónica de potência, pode-se definir duas gerações de conversores FACTS. A primeira inicialmente caracterizada pela utilização dos tirístores convencionais e uma segunda geração, de propósito e desenvolvimento mais recente, baseada na utilização de dispositivos de electrónica de potência com o a capacidade de controle de disparo e bloqueio como o GTO (Gate Turn-off Thyristor) e o IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).

3.4.1. Dispositivos FACTS baseados em impedâncias passivas

A maioria dos dispositivos FACTS baseados em impedâncias passivas utilizam o tiristor como elemento semiconductor, sendo que actualmente são utilizados dispositivos mais modernos e auto comutáveis.

Este tipo de dispositivos FACTS utiliza elementos passivos como condensadores, indutores e resistências, cuja inserção na rede é feita pela comutação de semicondutores.

São também designados por dispositivos FACTS de impedância variável. O tiristor é o semiconductor mais utilizado neste tipo de dispositivos, quer pelo peso histórico e no mercado, quer pelas potências superiores com que consegue lidar.

O tiristor pode ser controlado de duas maneiras:

- “tudo ou nada”, em que o tiristor apenas pode estar em dois estados: condução durante todo um meio ciclo da onda fundamental ou em não condução.
- Controlado através do ângulo de disparo (α), permitindo uma regulação contínua da potência reactiva fornecida por um elemento reactivo. O ângulo de disparo corresponde ao ângulo fasorial da onda de tensão da rede em que se deseja que o tiristor entre em condução.

Qualquer se seja o método de comutação usado, a condução do tiristor só pode ser interrompida no instante em que a corrente se anula e/ou inverte a sua polaridade. Nesta categoria incluíram-se também os dispositivos baseados em transformadores de potência porque podem ser considerados como elementos passivos. Segue-se aqui uma descrição mais detalhada dos dispositivos FACTS mais importantes desta categoria.

Desta categoria destacam-se os principais dispositivos:

- SVC (Static Var Compensator)
- TSR (Thyristor Switched Reactor)
- TSC (Thyristor Switched Capacitor)

3.4.2. SVC (Static Var Compensator)

Os dispositivos SVC (Static Var Compensator) dão compensadores que funcionam em paralelo com a rede, tal como os dispositivos MSC e MSR referidos anteriormente, utilizam elementos reactivos (indutâncias e/ou condensadores), a diferença está no processo da comutação, enquanto estes utilizam dispositivos mecânicos, no SVC utiliza interruptores formados por tiristores, o que faz com que se obtenha tempos de resposta e actuação muito mais rápidos. Este método permite diminuir significativamente os fenómenos transitórios produzidos pela corrente no instante da comutação.

Como será mostrado a seguir podem ser formados por TCR's, TSC's, TSR's ou pela combinação de vários.



3.4.2.1. TCR (Thyristor Controlled Reactor)

O *Thyristor-Controlled Reactor* (TCR) é um dispositivo capaz de absorver potência reactiva indutiva. O elemento base destes dispositivos consiste numa indutância ligado em série com um interruptor formado por dois tirístores colocados em antiparalelo, permitindo uma comutação bidireccional.

Através da comutação dos tirístores é possível variar o valor da tensão eficaz que é aplicado na indutância linear, esse controlo é feito através da regulação do ângulo de disparo de ambos os tirístores, de forma simétrica e constante, permitindo uma variação continua da potência reactiva que é fornecida pelo TCR.

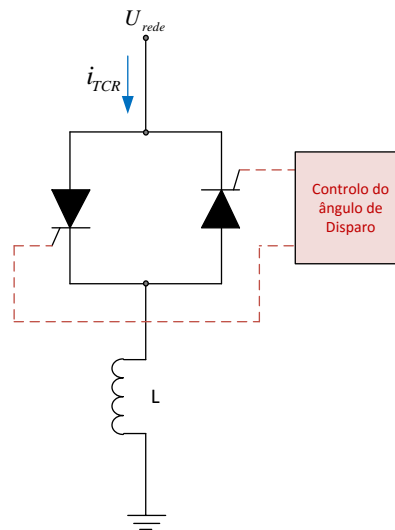


Figura 3.7 - Esquema unifilar monofásico do TCR

Os tirístores conduzem em semi-ciclos alternados da tensão. O valor eficaz da corrente varia em função do ângulo de disparo (α). A condução total ocorre para $\alpha = 90^\circ$ e a corrente obtida é idêntica à que se obteria caso os tirístores fossem curto-circuitados.

À medida em que α se aproxima de 180° , os tirístores se aproximam do corte, ou seja, passam a conduzir cada vez menos dentro do intervalo de um semicírculo. A corrente nos tirístores é essencialmente de natureza reactiva, estando 90° atrasada em relação à tensão, como pode ser visto na figura 3.8.

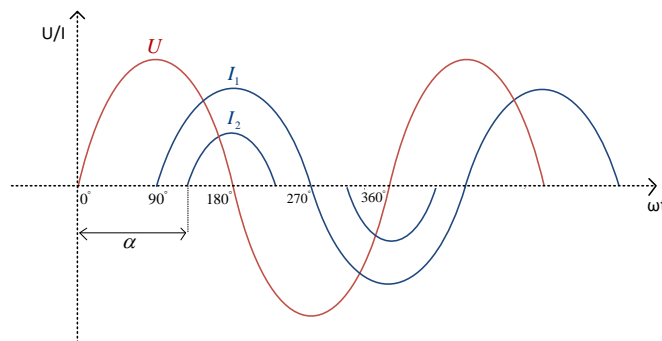


Figura 3.8 – Formas de onda da Tensão e Corrente do TCR

3.4.2.2. TSC (Thyristor Switched Capacitor)

O Thyristor Switched Capacitor (TSC), apresenta uma configuração idêntica ao TCR, mas este é constituído por um condensador em série com os tirístores, por norma encontra-se ligado com uma indutância em série com o condensador, tendo como objectivo limitar os transitórios criados pelas comutações e assim limitar as correntes de “inrush”.

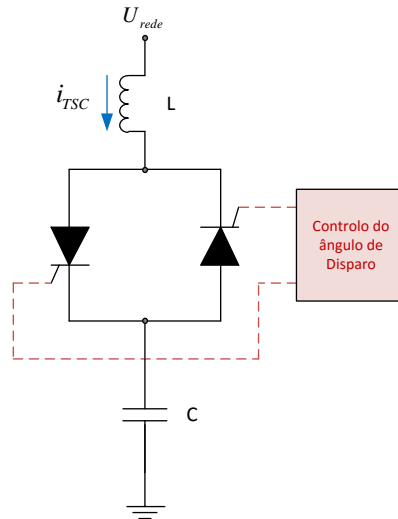


Figura 3.9 - Esquema unifilar monofásico do TSC

De forma a atenuar a ocorrência de correntes transitórias e minimizar a produção de harmónicas, o TSC deve ser comutado no instante em que a tensão da rede iguala a tensão do condensador, uma forma de o fazer e garantir que o condensador esteja carregado com a tensão máxima da rede e que o ponto de comutação seja no máximo da tensão da rede com é exemplificado na figura 3.10. Quando comparado com o TCR, este tem a vantagem de não introduzir harmónicas no sistema eléctrico.

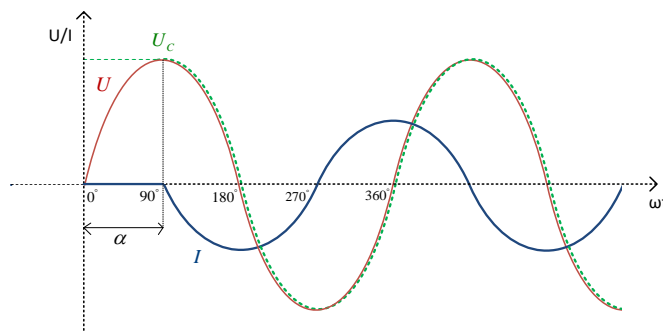


Figura 3.10 - Formas de onda da Tensão e Corrente do TSC

No TSC não é possível uma variação contínua da energia reactiva capacitiva injectada na rede, este apenas funciona em dois estados, ligado ou desligado da rede, ou seja os tirístores estão a condução ou ao corte. Para permitir uma maior regulação utiliza-se uma lógica de degraus composta por várias unidades capacitivas com o seu respectivo interruptor, obtendo assim uma unidade variável em quantidades discretas. Para se obter um sistema com pequenas variações de energia reactiva é necessário um maior e o número de TCS ligados em paralelo.



3.5. STATCOM

O STATCOM (Static Synchronous Compensator) é um equipamento com uma estrutura totalmente electrónica, que permite a compensação do factor de potência de forma dinâmica através da injeção ou absorção da energia reactiva na rede eléctrica. Tem propriedades de operação semelhantes ao compensador síncrono

Porém, a conexão do STATCOM à rede eléctrica é feita através de um transformador de média tensão. O STATCOM funciona como uma fonte controlada de potência reactiva, que através da regulação da tensão ou da corrente, dependendo do tipo da configuração do inversor, controla o fluxo de potência do sistema eléctrico. Como por exemplo, para o STATCOM com inversor fonte de tensão, representado na figura 3.11 quando a amplitude da tensão à saída do inversor é maior que a tensão da rede, a corrente, flui do STATCOM para a rede e o inversor injecta potência reactiva na rede eléctrica. Quando a amplitude da tensão da rede é menor que a tensão à saída do inversor a corrente flui da rede para o STATCOM, e o inversor absorve potência reactiva. A quantidade de potência reactiva a injectar ou absorver é directamente proporcional à diferença de tensão entre a rede e o STATCOM.

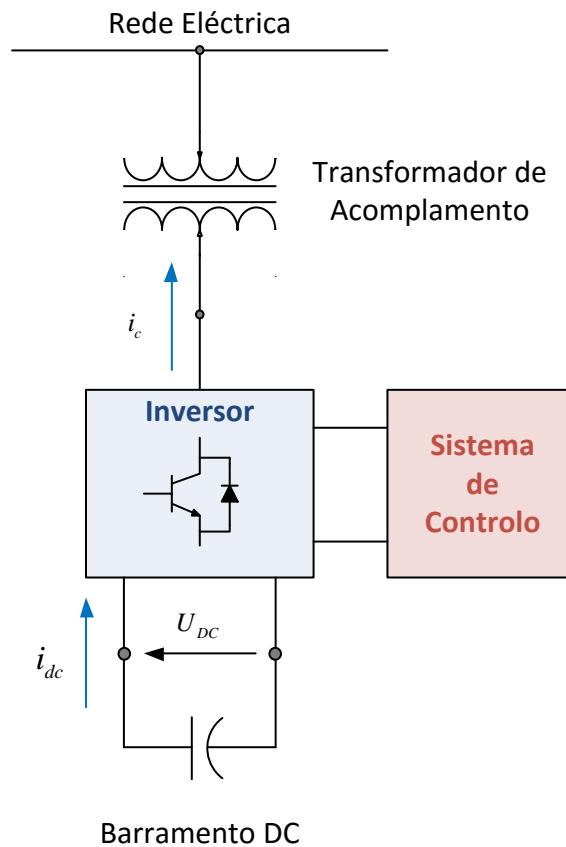


Figura 3.11 – Diagrama de blocos do STATCOM

4. Implementação do Mosfet Switched Capacitor

4.1. Introdução

Neste capítulo, são descritos os vários passos realizados para implementação do MSC (Mosfet switched Capacitor), tanto a nível de Hardware como de Software. Para uma melhor do funcionamento do sistema, fez-se uma divisão em circuitos, onde é explicado o funcionamento de cada um, e também referido o material necessário e explicadas as opções da escolha dos componentes. Na figura 4.1 pode-se observar a montagem final do sistema proposto.

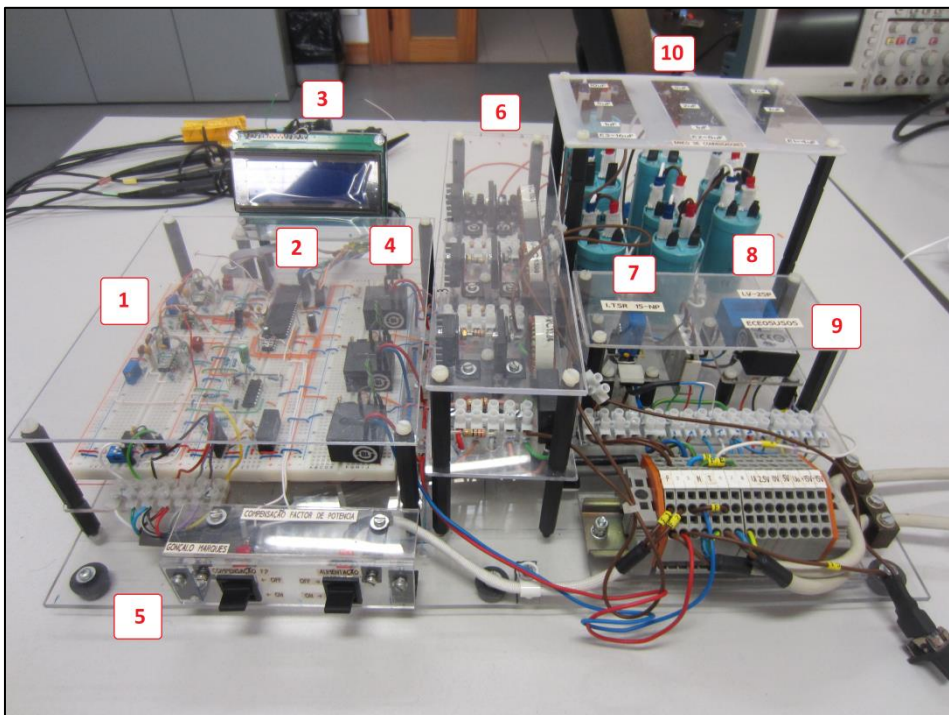


Figura 4.1 - Sistema de Compensação Mosfet Switched Capacitor

Legenda :

1. Circuitos de condicionamento de Sinal
2. Microcontrolador PIC 18F4520
3. Display LCD 20x4
4. Drivers dos Mosfets e respectivas alimentações
5. Botão On/Off e Botão Ligar/Desligar a compensação
6. Mosfet's
7. Transdutor de Corrente
8. Transdutor de Tensão
9. Conversor AC/DC
10. Banco de Condensadores



4.2. Diagrama de Blocos do Mosfet Switched Capacitor (Parte de Comando)

Na Figura 4.2 está representado o diagrama de blocos geral do sistema de compensação, relativamente a parte de comando, este diagrama dá uma perspectiva geral de todas as etapas e quais as suas principais funcionalidades.

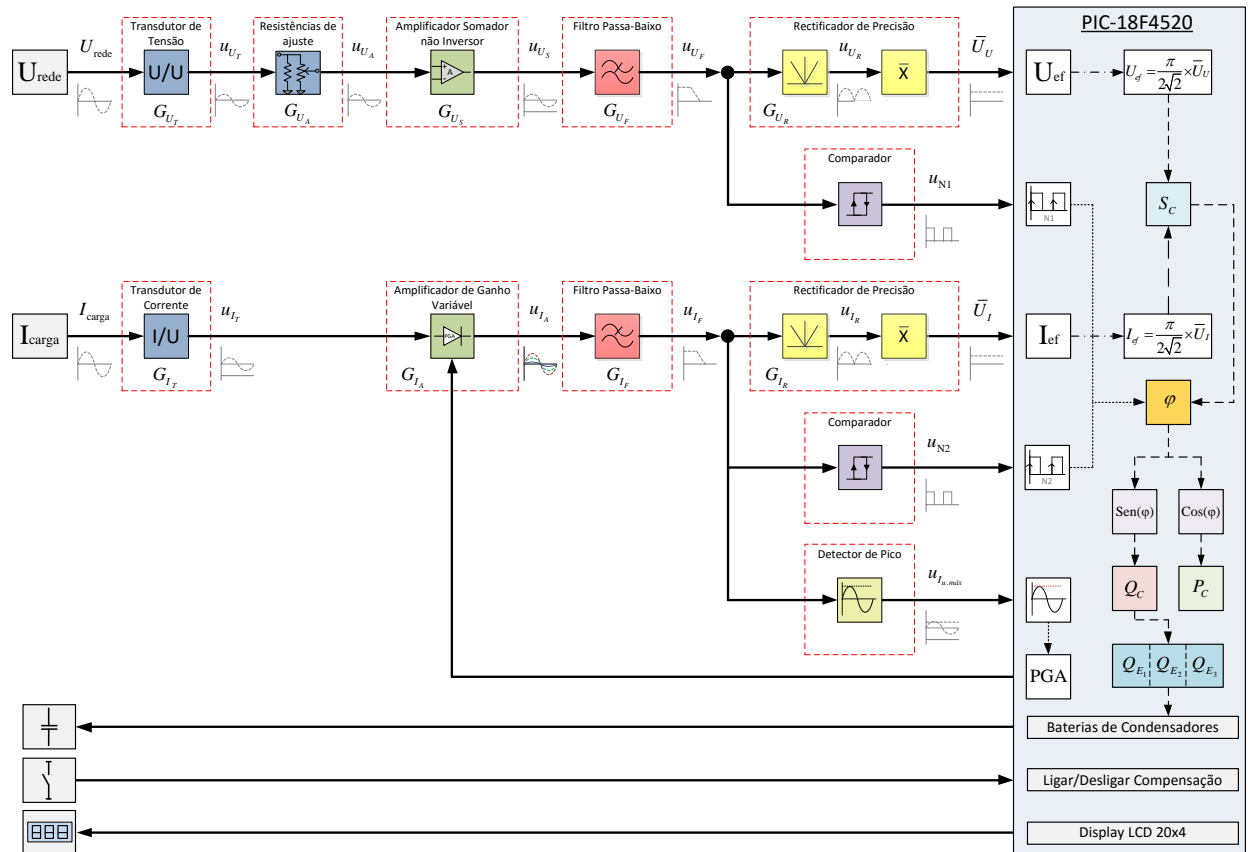


Figura 4.2 – Diagrama de Blocos do Sistema de Compensação (Parte Comando)

Para se efectuar a compensação da energia reactiva numa primeira fase o sistema terá que adquirir os sinais correspondentes a tensão da rede e corrente da carga. Isto será feito através de dois transdutores que permitem converter estas grandezas em valores de tensão reduzidos, de forma a que possam ser manipulados pela cadeia de condicionamento de sinal.

É possível dividir o diagrama de blocos em duas cadeias de condicionamento de sinal, uma para o tratamento da informação relativa a tensão u_{U_T} (Tensão da Rede) e outra para a tensão u_{I_T} (Corrente da Carga). Para que estes sinais possam ser recebidos pelo conversor ADC do microcontrolador é necessário que não ultrapassem os valores limite, da tensão de entrada.

Em ambas as cadeias de condicionamento será efectuada uma filtragem dos sinais por um filtro passa-baixo de 4ª ordem de forma a excluir todo o conteúdo harmónico presente nas formas de onda.

Após a filtragem dos sinais foi necessário efectuar a rectificação dos mesmos, uma vez que se tratam de ondas sinusoidais e não poderiam ser recebidas pelo microcontrolador. Ambos os sinais encontram-se referenciados a uma tensão contínua de 2,5V.

Numa segunda fase estes sinais serão recebidos e interpretados pelo microcontrolador, que efectuará todos os cálculos para determinação da melhor condição para se efectuar a compensação. Todas as informações relativas a carga serão visualizadas através de um display LCD, o sistema permite também o ligar/desligar da compensação.

Assim sendo é possível resumir:

➤ **Aquisição da tensão da rede:**

1. **Transdutor de Tensão:** Conversão da tensão eficaz da rede numa tensão proporcional através do transdutor LV 25-P.
2. **Resistências de medição:** Adaptação do sinal recebido do transdutor de tensão através das resistências de medição de forma a respeitar as indicações do fabricante e ao mesmo tempo não ultrapassar os limites de tensão do microcontrolador.
3. **Filtro Passa-Baixo:** Filtrar todo o conteúdo harmónico de ordem superior a 1ª harmónica de tensão.
4. **Rectificador de Precisão:** Rectificar a forma de onda sinusoidal e converter a mesma numa tensão continua que é igual ao valor médio da tensão de entrada

➤ **Aquisição da corrente da carga:**

1. **Transdutor de Corrente:** Conversão da corrente eficaz da carga numa tensão proporcional através do transdutor LTRS 15-NP.
2. **Amplificador de Ganho Variável (PGA):** Amplificação da tensão u_{I_T} (Corrente da Carga), numa primeira leitura o valor do ganho do PGA é unitário, após interpretação das grandezas por parte do microcontrolador, este determina a melhor situação para amplificação do valor da tensão u_{I_T} .
3. **Filtro Passa-Baixo:** Filtrar todo o conteúdo harmónico de ordem superior a 1ª harmónica.
4. **Rectificador de Precisão:** Rectificar a forma de onda sinusoidal e converter a mesma numa tensão continua que é o valor médio da que lhe deu origem.

➤ **Desfasamento entre a tensão da rede e a corrente da carga :** Efectuado por um comparador que permite detectar as passagens por zero da tensão e corrente.

➤ **Detector de pico:** Determinação do valor máximo da tensão u_{I_F} , este valor será recebido pelo ADC do microcontrolador para poder determinar qual a melhor condição para o Amplificador de Ganho Variável (PGA).



4.3. Circuitos do Sistema de Aquisição

Para uma melhor compreensão do sistema proposto elaborou-se um diagrama de blocos do sistema de compensação e respectivas ligações com a rede eléctrica, e a carga RL. O diagrama representado na Figura 4.3 encontra-se dividido em circuitos para uma melhor compreensão do seu funcionamento. Será feita uma explicação de todo o funcionamento do hardware do sistema, sendo que a parte correspondente ao software será explicada mais a frente.

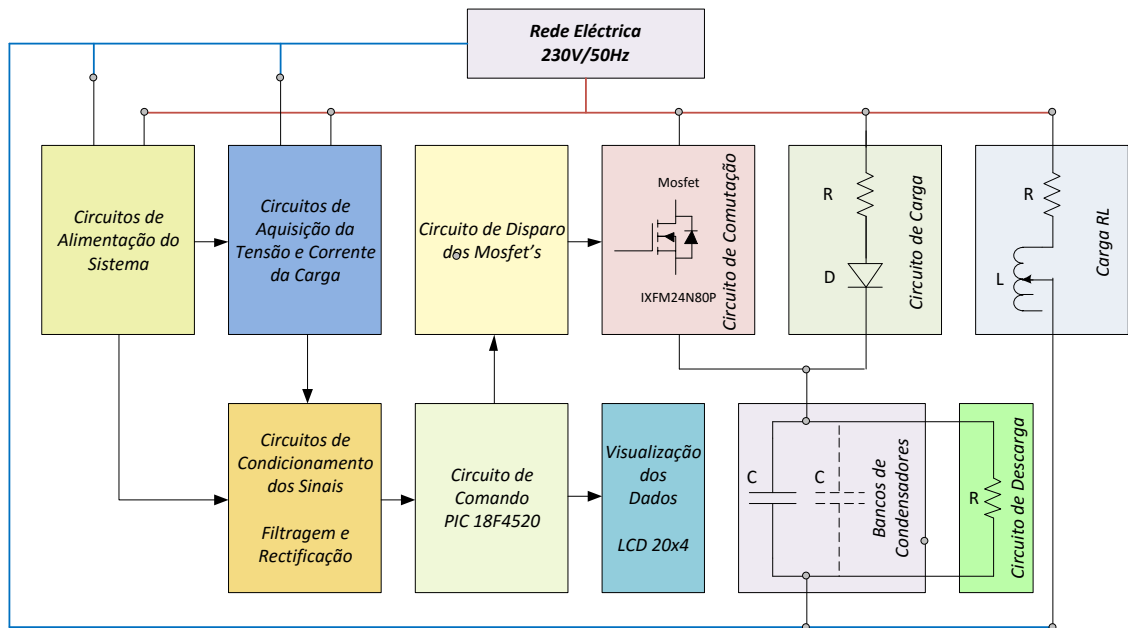


Figura 4.3 – Diagrama de Blocos dos Circuitos do Sistema

- O sistema desenvolvido é construído pelos seguintes circuitos:
- Circuitos de Alimentação
- Circuitos de Aquisição da Tensão e Corrente da Carga
- Circuitos de Condicionamento dos Sinais (Filtragem e Rectificação)
- Circuito de Comando e Processamento
- Circuito de Disparo dos Mosfet's
- Circuitos de Comutação
- Circuitos de Compensação, Carga e Descarga dos Condensadores
- Circuitos da Carga RL

4.3.1. Circuitos de Alimentação da parte de Comando

Para um correcto funcionamento dos equipamentos foi necessário providenciar determinadas alimentações de acordo com as especificações dos fabricantes. Na figura 4.4 Figura 4.4 – Esquema de Ligações dos Circuitos de Alimentação está representado o esquema de ligações das alimentações dos dispositivos que compõem a parte de comando do sistema .

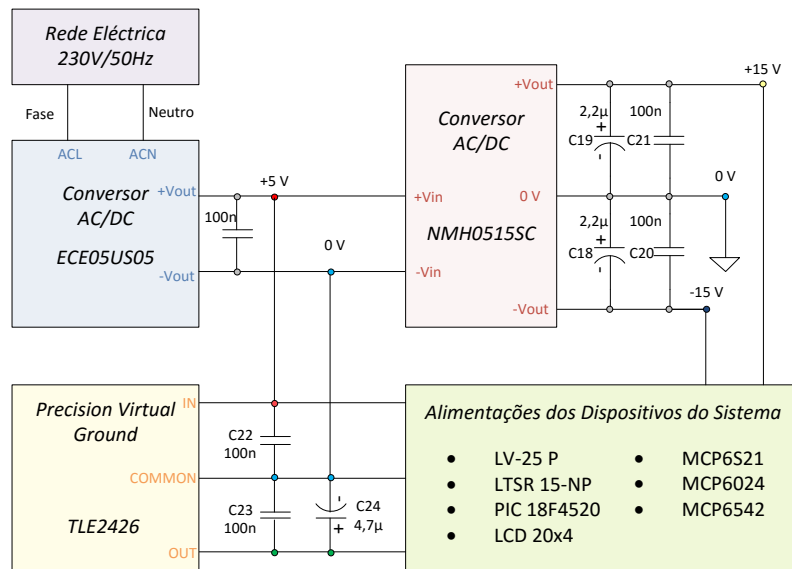


Figura 4.4 – Esquema de Ligações dos Circuitos de Alimentação (Comando)

4.3.1.1. Conversor AC/DC ECE05US05

O Conversor AC/DC ECE05US05 é um dispositivo cuja função é converter a tensão de entrada da rede 230V 50Hz numa tensão contínua de 5V e destina-se a fornecer alimentação ao transdutor de corrente, circuitos de condicionamento de sinal, ao conversor DC/DC (NMH0515SC), TLE 2426 e ao display 20x4.

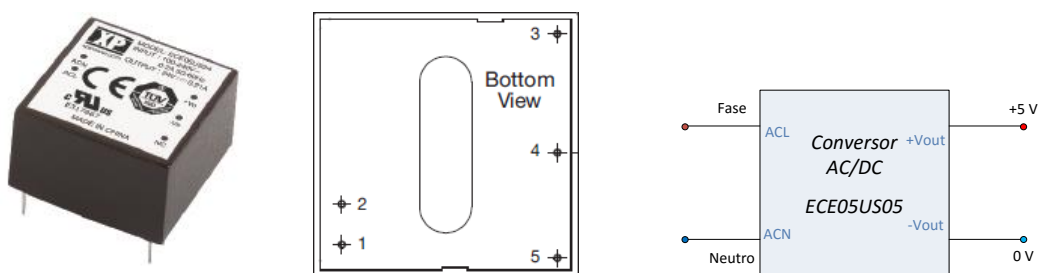


Figura 4.5 – Conversor AC/DC ECE05US05



4.3.1.2. Fonte Comutada NMH0515SC

A fonte comutada NMH0515SC permite a conversão de uma tensão unipolar de 5V numa tensão bipolar de $\pm 15V$, sendo necessária para a alimentação do transdutor de tensão.

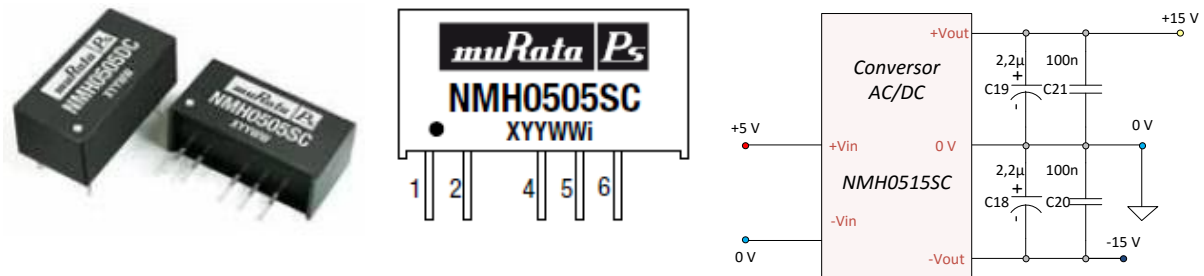


Figura 4.6 - Fonte comutada NMH0515SC

4.3.1.3. Precision Virtual Ground TLE 2426

Vai permitir criar uma nova tensão de referência ao transformar a tensão de alimentação numa tensão de 2,5V.

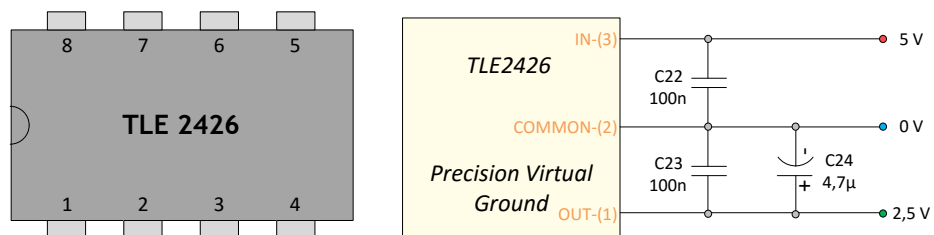


Figura 4.7 – Precison Virtual Ground TLE 2426

4.3.2. Circuitos de Alimentação da parte de Potência

Relativamente a parte de potência houve a necessidade de alimentar os circuitos de disparo dos Mosfet's com uma alimentação unipolar de +15V, de acordo com a Figura 4.8, o dispositivo escolhido foi o conversor AC/DC ECE05US15.

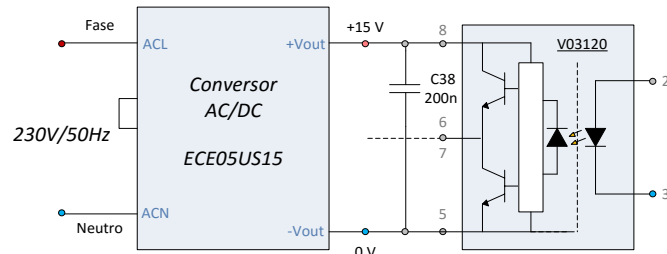


Figura 4.8 – Esquema de Ligações dos Circuitos de Alimentação (Potência)

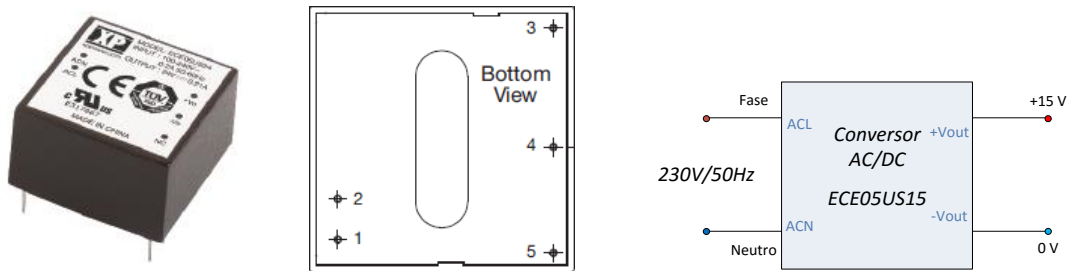


Figura 4.9 - Conversor AC/DC ECE05US15



4.3.3. Circuitos de Aquisição da Tensão da Rede e Corrente da Carga

Á aquisição dos sinais analógicos referentes a tensão da rede e corrente da carga será efectuado por um transdutor de tensão e outro corrente para medição dos respectivos valores.

4.3.3.1. Transdutor de tensão LEM LV 25-P e seu dimensionamento

Para se efectuar a medição da tensão da rede eléctrica foi utilizado no trabalho o sensor LV 25-P do fabricante LEM. Tem como princípio de funcionamento o efeito de Hall em circuito fechado (*closed loop*), este sensor é alimentado com uma tensão contínua bipolar de $\pm 15V$ e suporta tensões de entrada AC ou DC de 10 V até 500 V.

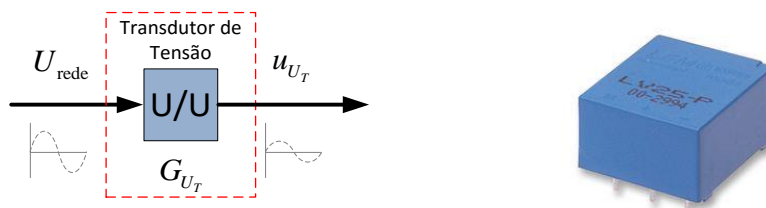


Figura 4.10 - Transdutor de tensão LEM© LV 25-P

O circuito de medição garante o isolamento galvânico entre o circuito primário (rede eléctrica) e o circuito secundário (circuito de condicionamento de sinal), o sensor apresenta uma boa precisão, linearidade e imunidade perante interferências externas, sendo o circuito aconselhado pelo fabricante representado na figura 4.11.

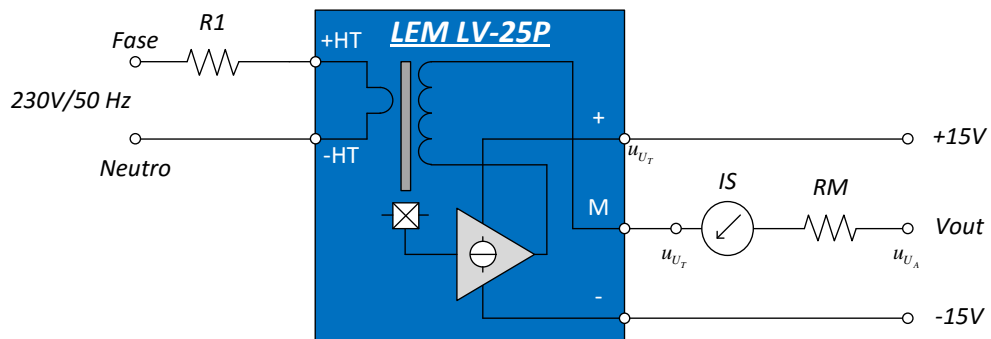


Figura 4.11 - Esquema de montagem do transdutor de tensão LV 25-P

O transdutor de tensão tem como princípio de funcionamento a conversão da tensão do primário numa corrente proporcional do lado do secundário. De modo a que corrente no primário não ultrapasse o valor nominal admissível de 10 mA, dado pelo fabricante é necessário a colocação de uma resistência (R1) no lado do primário, tendo em conta o valor da tensão da rede, o valor escolhido para (R1) foi de 25 k Ω , que para uma tensão de aproximadamente 230V no primário temos:

$$I_{PN} = \frac{U_{rede}}{R_1} \quad (4.1)$$

Sabendo que relação de transformação do circuito primário para o secundário e de (2500:1000), isto significa que a corrente que percorre o circuito Secundário e 2,5 vezes maior que a do circuito primário logo :

$$\frac{I_{SN}}{I_{PN}} = \frac{2500}{1000} \Leftrightarrow I_{SN} = I_{PN} \times 2,5 \quad (4.2)$$

Dado que a saída do transdutor (M), o valor recebido é em corrente, é necessário a sua conversão numa tensão para posterior leitura pelo conversor ADC do microcontrolador, essa conversão é feita recorrendo a uma resistência de medição (RM) , que é escolhida em função da tensão de alimentação de acordo os valores dados pelo fabricante.

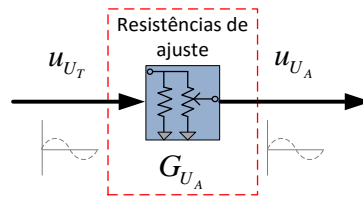


Figura 4.12 – Diagrama de blocos (Resistências de Ajuste)

De maneira a que estas condições fossem cumpridas e ao mesmo tempo seja feita uma atenuação da amplitude do sinal, foi utilizado um divisor de tensão de acordo com figura 4.13.

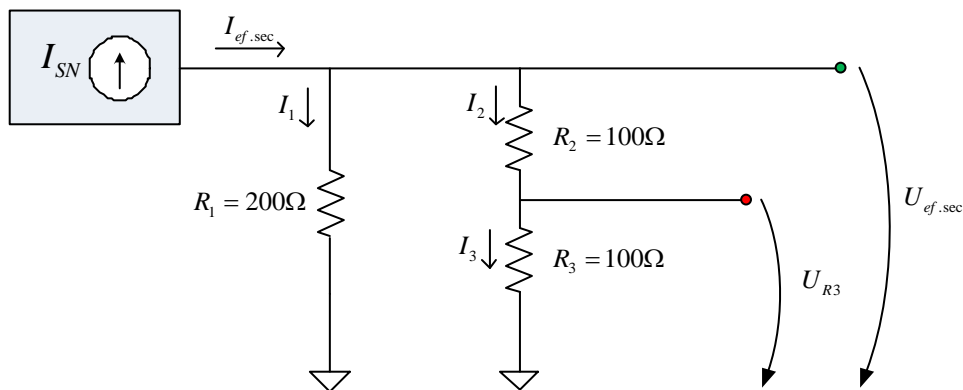


Figura 4.13 – Esquema de ligação das resistências de ajuste

De acordo com o esquema na Figura 4.13 é possível verificar que:

$$R_T = (200\Omega // (100\Omega + 100\Omega)) \Leftrightarrow R_T = 100\Omega \quad (4.3)$$

E a tensão na resistência de medição R_3 por:

$$U_{R3} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \times U_{ef.sec} \quad (4.4)$$

Este sensor exigiu um circuito somador não inversor para adicionar uma componente DC do sinal e coloca-lo nos valores pretendidos, situação que será vista mais a frente.



4.3.3.2. Transdutor de corrente LEM LTRS 15-NP e seu dimensionamento

Para a medição da corrente da carga foi usado o sensor LTRS 15-NP também fabricado pela LEM, baseia-se no efeito de Hall em circuito fechado (closed loop). Este sensor é alimentado em tensão contínua unipolar de aproximadamente +5 V, e é capaz de medir até 15 A *RMS*.

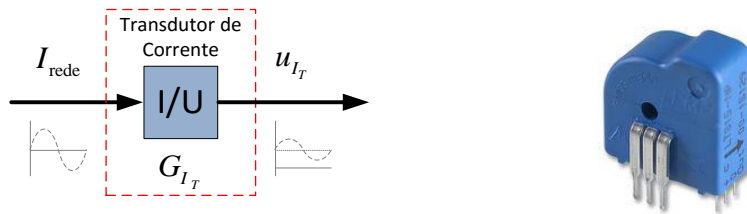


Figura 4.14 - Transdutor de corrente LEM© LTRS 15-NP

Tal como o sensor de tensão também garante o isolamento galvânico entre o primário e secundário, apresentando uma elevada linearidade e precisão, o sinal à saída encontra-se referenciado a 2,5V.

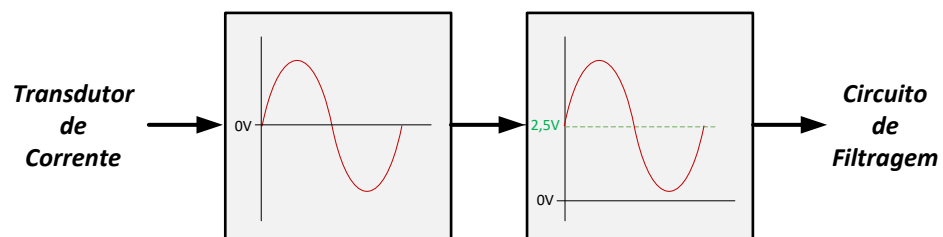


Figura 4.15 – Formas de onda da tensão do transdutor de corrente

O circuito aconselhado pelo fabricante para a montagem do sensor encontra-se representado na figura 4.16.

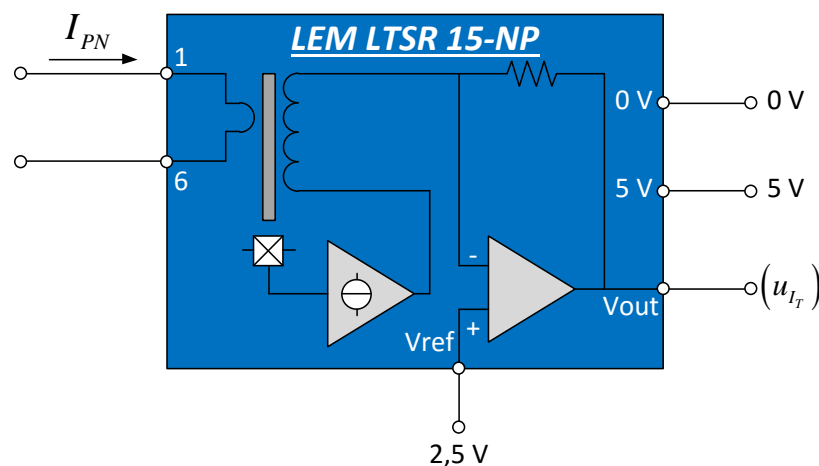


Figura 4.16 - Esquema de montagem do transdutor de tensão LTRS 15-NP

Existe a possibilidade de configuração do número de enrolamentos do primário de acordo com as especificações do fabricante, uma vez que a corrente máxima será aproximadamente 2 A, foi escolhido a configuração de acordo com a Tabela 5 e efectuado o esquema de ligações de acordo com a figura 4.17.

Número de espiras no primário	Corrente nominal RMS do primário I_{PN} (A)	Tensão nominal à saída V_{out} (V)	Resistência do Primário R_p (Ω)	Indutância no Primário R_p (μ H)
3	± 5	$2,5 \pm 0,625$	1,62	0,12

Tabela 5 – Configuração do Número de espiras no Primário

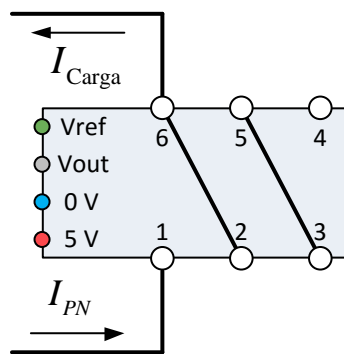


Figura 4.17 – Esquema de Ligações do Primário do Transdutor de Corrente

O transdutor de corrente tem como princípio de funcionamento a conversão da corrente do primário numa tensão cuja relação é dada pela equação (4.5).

$$V_{out} = 2,5 \pm \left(0,625 \times \frac{I_p}{I_{PN}} \right) \quad (4.5)$$

Onde:

V_{out} = Tensão de saída (Secundário do transdutor)

I_p = Corrente de entrada (Primário do transdutor)

I_{PN} = Faixa de corrente nominal no Primário



4.3.4. Circuitos de Condicionamento dos Sinais Analógicos

Os circuitos de condicionamento de sinal são circuitos electrónicos alimentados em corrente contínua. Estes circuitos ajustam os valores da tensão à entrada do microcontrolador, de modo a corresponderem com os valores exactos dos circuitos de *driver* e do próprio microcontrolador, respeitando os valores recomendados pelos fabricantes.

Exemplos disso são os sinais à entrada do microcontrolador que devem ser ajustados para que o valor máximo de 5 V não seja ultrapassado, valor nominal de funcionamento convencionado pelo fabricante.

Uma vez que o ADC do microcontrolador PIC18f4520 não é bipolar, adicionou-se um valor de offset à tensão e à corrente a saída dos sensores, com intuito de ajustar os sinais à entrada do circuito de Sample and Hold do ADC para valores compreendidos entre 0 V e 5 V.

Estes valores correspondem aos valores máximo e mínimo admissíveis pelo microcontrolador.

4.3.4.1. Circuito Amplificador Somador Não Inversor

Na aquisição da tensão da rede, U_{R3} é uma onda sinusoidal cuja a referência é em zero, uma vez que a alternância negativa da tensão não pode ser interpretada pelo conversor A/D do microcontrolador houve a necessidade de criar uma nova referência e de certa forma deslocar o sinal para um intervalo de tensão compreendido entre 0V e 5V, figura 4.19.

Para fazer a deslocação do sinal foi utilizado uma montagem de um somador não inversor de acordo com a seguinte figura 4.18

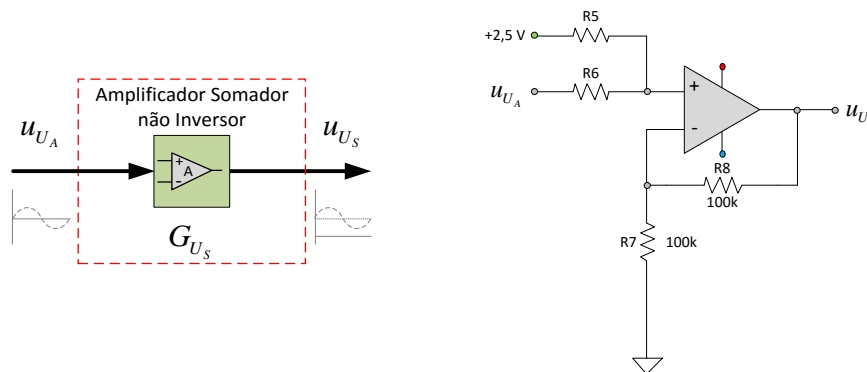


Figura 4.18 – Diagrama de Blocos e esquema de ligações do Somador não Inversor

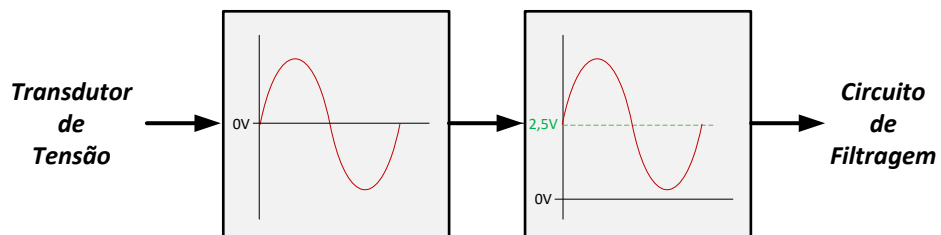


Figura 4.19 – Formas de onda da tensão do Somador não Inversor

4.3.4.2. Amplificador de Ganho Variável (PGA)

O amplificador de ganho variável tem como função amplificar a forma de onda da corrente quando esta é demasiado pequena.

Numa primeira leitura da tensão o microcontrolador vai determinar qual a melhor situação e com isso programar o MCP6S21 para um novo valor do ganho.

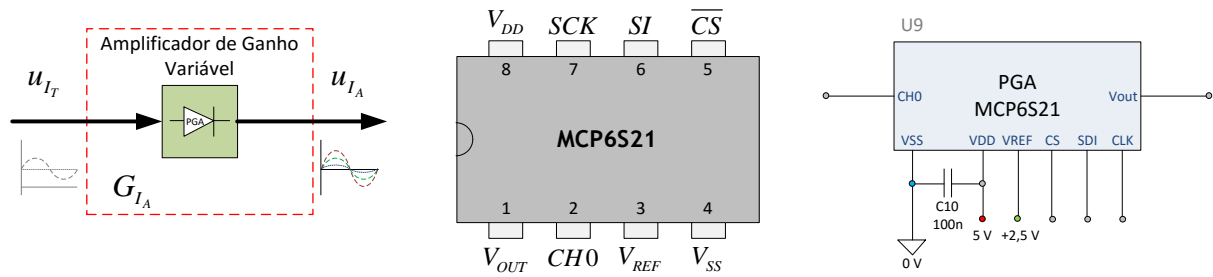


Figura 4.20 - Diagrama de Blocos e esquema de ligações do “PGA”

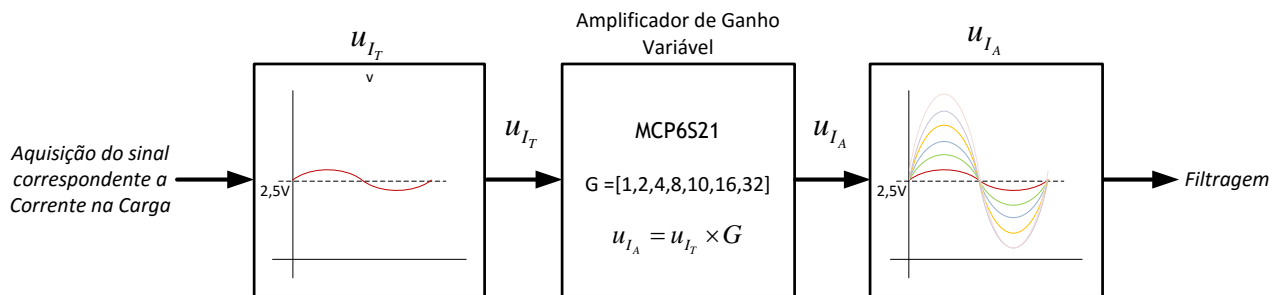


Figura 4.21 - Formas de onda da tensão do “PGA”



4.3.4.3. Filtragem analógica dos sinais de tensão e corrente

A filtragem dos sinais vai ser efectuada de igual modo na cadeia de tensão e corrente, pelo que o dimensionamento será o mesmo nos dois circuitos.

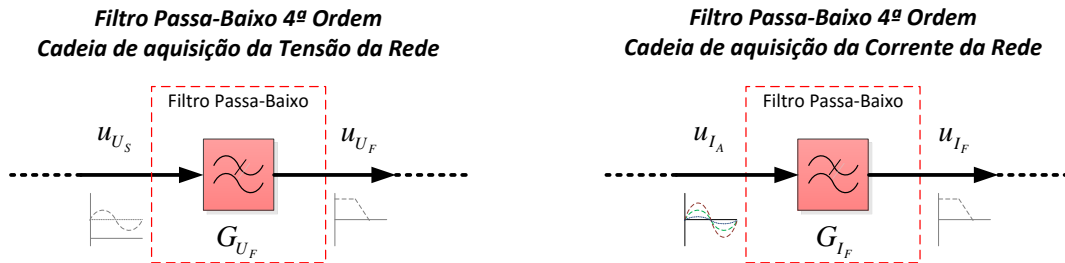


Figura 4.22 – Diagrama de Blocos Filtro Passa-Baixo da cadeia tensão/corrente

De forma a eliminar o conteúdo harmónico presente nas formas de onda de tensão u_{U_s} e u_{I_A} , utilizou-se um filtro activo Passa-baixo de quarta ordem para filtrar as frequências indesejadas, apenas vai permitir a passagem de frequências abaixo da frequência de corte (Banda Passante), obtendo assim apenas a parte útil do sinal que interessa para se efectuar a compensação do factor de potência apenas associado a primeira harmónica.

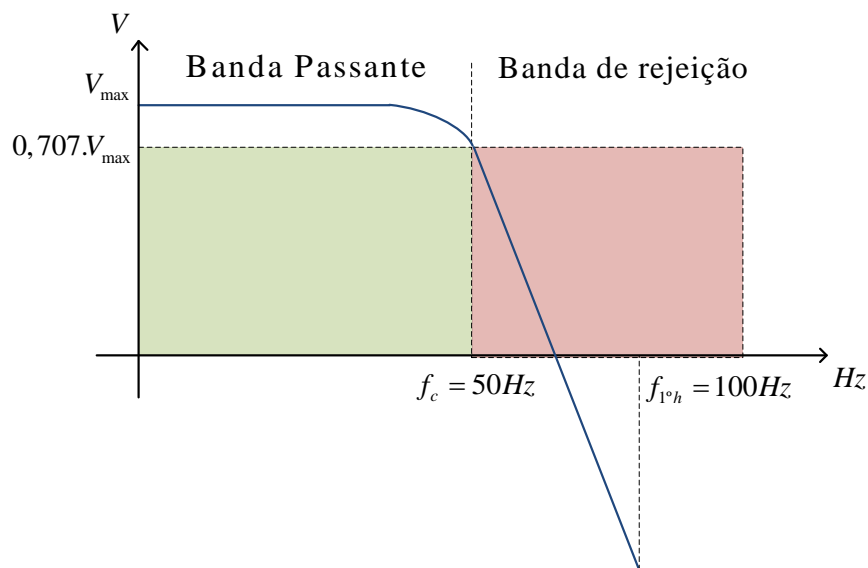


Figura 4.23 – Filtragem dos Sinais de tensão e corrente

Legenda :

f_c - Frequência de corte : valor de frequência f_c para o qual o ganho decresce de $\sqrt{2}/2$ ou de 3 dB relativamente à banda passante G_o

$f_{1^a h}$ - Frequência associada a primeira harmónica

Tabela 6 – Dados do Filtro

Ganho Banda Passante	1	V/V
Frequência corte	50	Hz
Atenuação	- 20	dB
Frequência (Banda rejeição)	100	Hz

Dado que a frequência útil do sinal encontra-se nos 50 Hz, vamos considerar a mesma como sendo a nossa frequência de corte fazendo com que a 2ª harmónica com o valor 100 Hz e restantes já se encontrem na banda de rejeição e sendo por isso rejeitadas pelo filtro.

Para obter uma atenuação de pelo menos 20 dB aplicou-se um filtro Butterworth de 4ª ordem.

- Atenuação de pelo menos 20 dB

$$G(f)_{dB} = 20 \cdot \log_{10} G(f) \Leftrightarrow G(f) = 0,1 \text{ V/V} \quad (4.6)$$

- $n = 4$ (Filtro de 4ª ordem)
- $G_0 = 1$ (Ganho)
- $f = 100 \text{ Hz}$ (Frequência da 2ª Harmónica)
- $G(f) = 0,1 \text{ V/V}$

$$G(f)_{dB} = \frac{G_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2 \cdot n}}} \Leftrightarrow 0,1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{100}{f_c}\right)^{2 \cdot 4}}} \Leftrightarrow f_c = 56,30 \text{ Hz} \quad (4.7)$$



- Filtro Butterworth de ordem n

Os filtros Butterworth são definidos pela propriedade de máximo aplanamento da característica de amplitude da banda passante, sendo esta característica uma função monotónica (continuamente crescente/decrescente da frequência).

Estes filtros apresentam uma função de transferência (F.T) genérica na forma:

$$H(s) = \frac{k_o}{\prod_{k=1}^n (s - s_k)} \quad ; \quad k_o = \prod_{k=1}^n -s_k \quad (4.8)$$

Onde s_k são os pólos cujo valor é dado por :

$$s_k = e^{j\pi \left[\frac{1}{2} + \frac{2k-1}{2n} \right]}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (4.9)$$

e k_o é uma contante de normalização, a qua força $H(s) = 1$ quando $s = 0$. Os pólos encontram-se distribuídos ao longo de um semi-círculo no semi-plano esquerdo complexo s (SPE), cumprindo-se deste modo a condição necessária de estabilidade, i.e, todos os pólos da FT terem parte real negativa. O afastamento relativo dos pólos da F.T é uma função da ordem n do filtro sendo de $180^\circ/n$.

Considerando que o filtro apresenta um ganho H_0 na banda passante a F.T vem agora dada por :

$$H(s) = \frac{H_0}{\prod_{k=1}^n (s - s_k)} \quad (4.10)$$

Ou de outro modo:

$$\frac{H(s)}{H_0} = \frac{1}{(s - s_n)(s - s_{n-1})(s - s_{n-2}) \dots (s - s_1)} = \frac{1}{B_n(s)} \quad (4.11)$$

É com base no polinómio $B_n(s)$, que se consegue assegurar que o filtro de ordem n apresente sempre os polos distribuídos ao longo de um semi-círculo no SPE.

Portanto, a síntese de um filtro de ordem n deve ser realizada considerando os seguintes coeficientes de Butterworth na forma factorizada (para uma frequência de $\omega = 1$ rad/s);

Para $n=4$ temos $B_n(s) = (s^2 + 0,765s + 1). (s^2 + 1,848s + 1)$

Através do polinómio é possível o dimensionamento de um filtro de 4º ordem tendo por base secções ou estágios de 1ª e 2ª ordem.

Assim sendo o circuito de filtragem da cadeia de aquisição é constituído por dois estágios de 2º Ordem, figura 4.24.

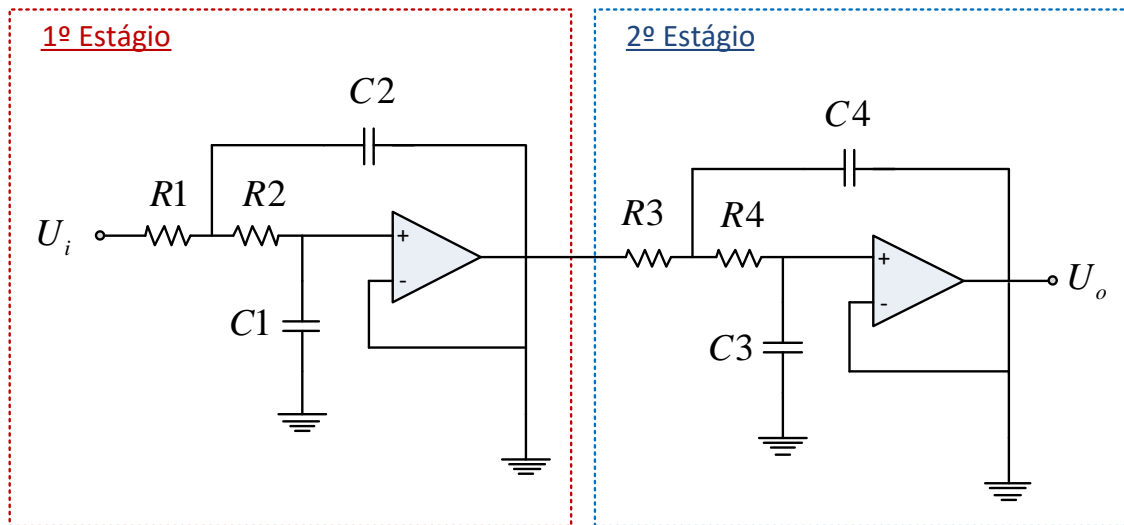


Figura 4.24 – Circuito de Filtragem

➤ O Cálculo do Factor de Qualidade (Q), nos dois estágios e dado pela expressão (4.12):

$$Q = \frac{1}{\alpha} \quad (4.12)$$

- Sendo $\alpha_1 = 0,765$ o Factor de Qualidade no 1º estágio é:

$$Q_1 = \frac{1}{0,765} = 1,30719 \quad (4.13)$$

- Sendo $\alpha_2 = 1,848$ o Factor de Qualidade no 2º estágio:

$$Q_2 = \frac{1}{1,848} = 0,54112 \quad (4.14)$$

➤ O Cálculo do valor do (m) é dado de acordo com a equação

$$m \leq \frac{1}{4 \cdot Q^2} \quad (4.15)$$

- Valor de m no 1º estágio:

$$m_1 \leq 0,146 \quad (4.16)$$

- Valor de m no 2º estágio:

$$m_2 \leq 0,854 \quad (4.17)$$



➤ Escolha do valor dos condensadores de acordo com a tabela da série E12

- O Valor de C_1 e C_2 do 1º estágio é dado pela expressão:

$$0,146 \leq \frac{C_1}{C_2} \quad (4.18)$$

Para manter a relação foram escolhidos os seguintes valores:

$$m_1 = 0,122, \text{ onde } C_1 = 1 \text{ e } C_2 = 8,2 \quad (4.19)$$

- O Valor de C_3 e C_4 do 2º estágio é dado pela expressão:

$$0,854 \leq \frac{C_3}{C_4} \quad (4.20)$$

Para manter a relação foram escolhidos os seguintes valores:

$$m_2 = 0,833, \text{ onde } C_3 = 1 \text{ e } C_4 = 1,2 \quad (4.21)$$

➤ O Cálculo do valor do (n) de acordo é dado pela equação (4.22)

$$n = \left(\frac{1}{2 \cdot m \cdot Q^2} - 1 \right) \pm \frac{1}{2 \cdot m \cdot Q^2} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot m \cdot Q^2} \quad (4.22)$$

- Valor de n no 1º estágio:

$$n_1 = 2,376 \text{ ou } n_1 = 0,421 \quad (4.23)$$

- Valor de n no 2º estágio:

$$n_2 = 1,370 \text{ ou } n_1 = 0,730 \quad (4.24)$$

➤ De acordo com a equação (4.25) determinou-se o valor de R para as duas situações:

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{m \cdot n \cdot R \cdot C}} \quad (4.25)$$

- No 1º estágio $R_1 = R$ e $C_2 = C$, o que resulta em:

$$R_1 = 720,9871 \quad (4.26)$$

- No 2º estágio $R_3 = R$ e $C_4 = C$, o que resulta em:

$$R_3 = 2483,369 \quad (4.27)$$

➤ Cálculo dos valores de R_2 e R_4 :

- No 1º estágio:

$$n_1 = \frac{R_2}{R_1} \Leftrightarrow R_2 = 1713,11 \quad (4.28)$$

- No 2º estágio:

$$n_2 = \frac{R_4}{R_3} \Leftrightarrow R_4 = 3401,352 \quad (4.29)$$

➤ Valores das Resistências e Condensadores no 1º Estágio:

R_1	750 Ω
R_2	1,8 k Ω
C_1	1 μ F
C_2	8,2 μ F

➤ Ajuste do valor dos condensadores considerando o novo valor de $C_2 = 820$ nF:

R_1	7,5 k Ω
R_2	18 k Ω
C_1	100 nF
C_2	820 nF

➤ Valores das Resistências e Condensadores no 2º Estágio

R_3	2,4 k Ω
R_4	3,3 k Ω
C_3	1 μ F
C_4	1,2 μ F

➤ Ajuste do valor dos condensadores considerando o novo valor de $C_4 = 120$ nF

R_3	24 k Ω
R_4	33 k Ω
C_3	1 μ F
C_4	120 nF



4.3.4.4. Rectificação dos Sinais de tensão e corrente

Após a filtragem dos sinais através do filtro passa-baixo de quarta ordem onde excluimos o conteúdo harmónico de ordem superior a primeira harmónica na forma de onda da tensão e corrente, é necessário converter e condicionar os sinais para que possam ser recebidos pelo conversor A/D do microcontrolador.

Uma vez que estamos presentes tensões muito reduzidas a rectificação dos sinais não poderá ser efectuada recorrendo a uma simples montagem com díodos, pois iria-se obter uma rectificação com um sinal bastante deformado. Uma das formas encontradas é utilização de um circuito rectificador de precisão de onda completa figura 4.26, o circuito é composto por dois amplificadores operacionais tornando possível fazer a rectificação de sinais fracos sem distorção, graças ao elevado ganho de tensão dos amplificadores.

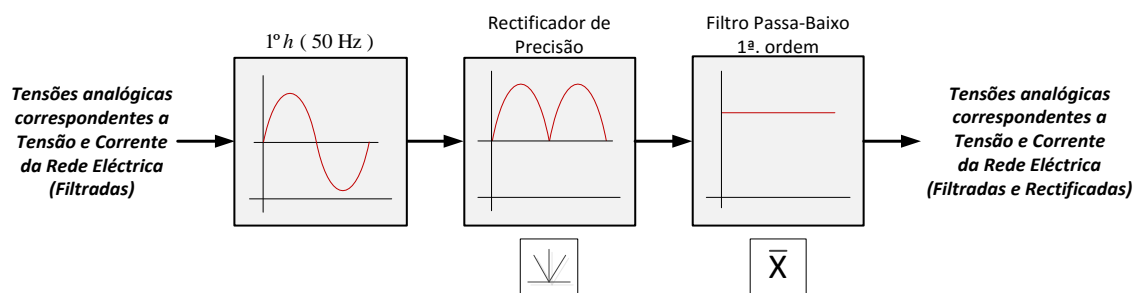


Figura 4.25 – Formas de onda antes e após do rectificador de precisão

A forma de onda rectificada irá apresentar um conteúdo harmónico que irá ser o dobro da componente fundamental, a mesma irá ser novamente filtrada com o auxílio da introdução de um condensador na montagem do rectificador de precisão. No final iremos obter o valor médio da forma de onda sinusoidal, a escolha do condensador terá que obedecer a determinados critérios, pois o *ripple* da tensão terá que ser inferior a resolução do conversor A/D de forma a não afectar o funcionamento do mesmo.

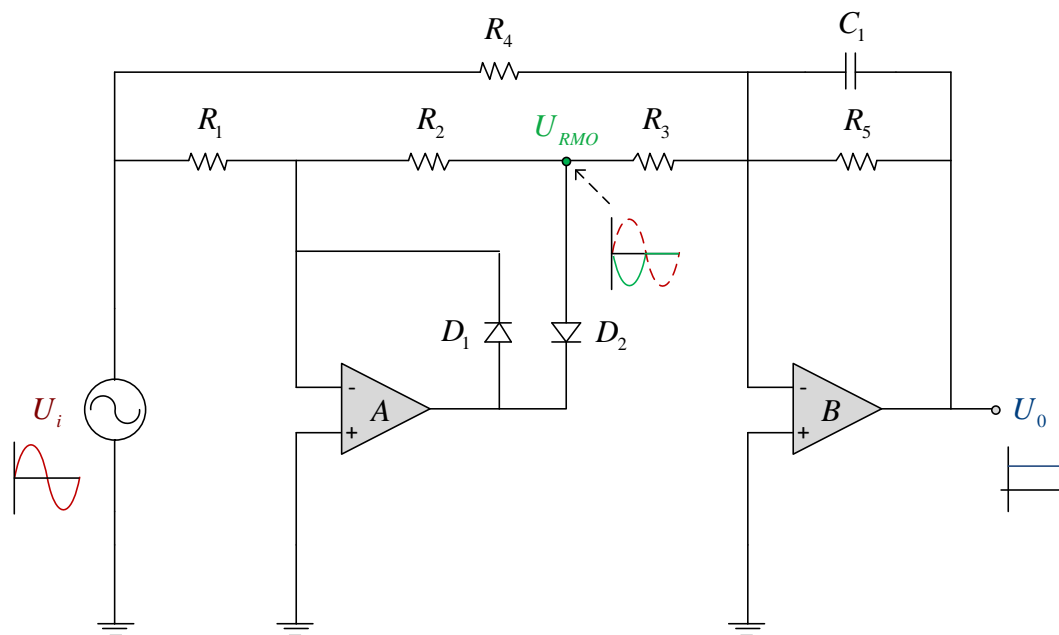


Figura 4.26 - Circuito rectificador de precisão de onda completa

O circuito é composto por duas partes uma primeira onde temos uma rectificação de meia onda invertida, a segunda parte é efectuada a soma do resultado da rectificação de meia onda invertida com a tensão de entrada. A segunda parte do circuito é constituída por o Ampop B cuja configuração é um somador inversor.

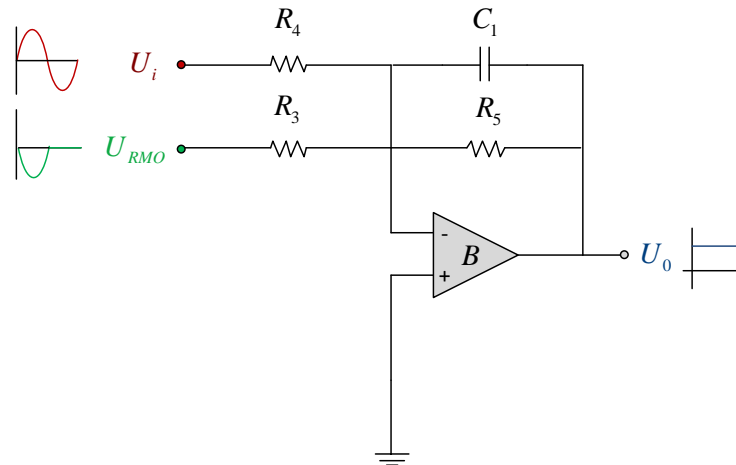


Figura 4.27 – Circuito de obtenção do valor médio da tensão de entrada

Uma vez que a tensão U_0 necessita de um filtro de 1º ordem isso é conseguido com a introdução de um condensador na montagem na malha de feedback, este vai permitir que seja efectuada a filtragem do sinal e ao mesmo temos na saída U_0 vamos obter o valor médio da tensão de entrada U_i .

➤ Cálculo da função de transferência do circuito anterior:

- Com a introdução do condensador na malha de feedback ficamos com:

$$Z_1 = \left(\frac{1}{C_1 s} // R_5 \right) = \frac{R_5}{R_5 C_1 s + 1} \quad (4.30)$$

- Aplicando o teorema da sobreposição para as tensões de entrada no somador inversor temos:

$$U_0 = - \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \left(\frac{R_5}{R_4} u_1 + \frac{R_5}{R_3} u_2 \right) \quad (4.31)$$

O valor do condensador a introduzir tem que respeitar determinadas regras uma vez que temos que ter especial atenção ao *ripple* da forma de onda, pois o conversor A/D do microcontrolador não poder interpretar isso com uma mudança de valor.



➤ Cálculo do valor do condensador C_1 :

- O valor do ganho do filtro é igual a:

$$U_0(f) = G(f).U_i(f) \Leftrightarrow G(f) = \frac{U_0}{U_i}(f) \quad (4.32)$$

- Tendo em conta que:

$$U_0 \leq \frac{q}{2} \text{ e } U_i = \frac{4U}{3\pi} \quad (4.33)$$

- O que resulta na expressão (4.34):

$$G(f) \leq \frac{\frac{0,002441}{2}}{\frac{4 \times 2,5}{3\pi}} \Leftrightarrow G(f) \leq 0,001150486 \Leftrightarrow G(f)_{dB} \leq -58,78 \text{ dB} \quad (4.34)$$

$$G(f) = \frac{G(0)}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2.n}}} \quad (4.35)$$

- Onde $G(0) = 1$ e $n = 1$ (1ª ordem)

$$G(f) = \frac{G(0)}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2.n}}} \Leftrightarrow 0,001150486 = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{100}{f_c}\right)^{2.1}}} \Leftrightarrow f_c = 0.115 \quad (4.36)$$

- De acordo com a expressão (4.37), determinou-se que o par de valores RC

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (4.37)$$

- Resultado em:

$$R \cdot C = 1,38 \quad (4.38)$$

- De entre os valores admissíveis, os valores escolhido foram $R = 20 \text{ k}\Omega$ e $C = 69,2 \text{ }\mu\text{F}$

4.3.4.5. Circuito de detecção da passagem por zero da tensão e corrente

O circuito que faz a detecção da passagem por zero da tensão e corrente, por hardware, é desenvolvido com base no circuito integrado MCP6542 do fabricante Microchip.

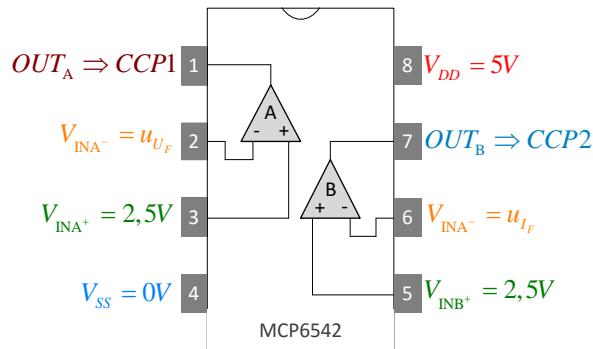


Figura 4.28 – Circuito da detecção da passagem por zero da tensão e corrente

Detecção da passagem por zero da Tensão

Detecção da passagem por zero da Corrente

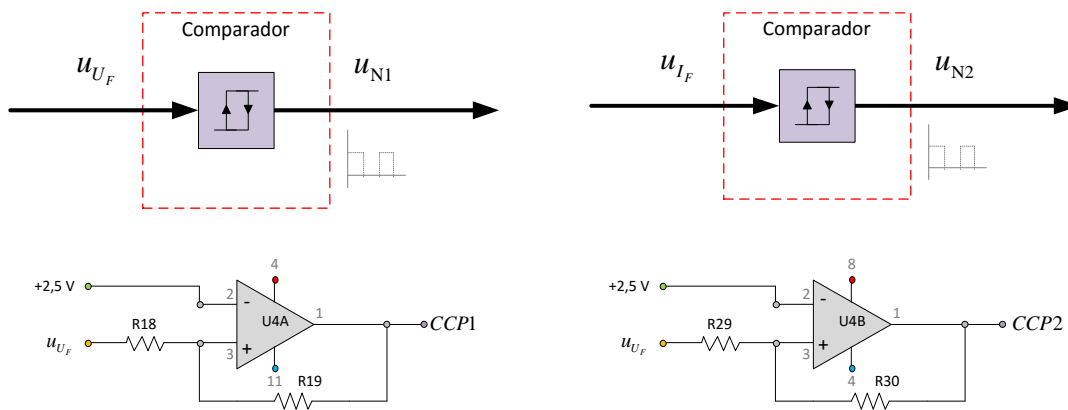


Figura 4.29 – Diagrama de blocos e esquema de ligações do MCP6542

Para a detecção da passagem por zero da tensão e corrente utilizou-se o circuito integrado MCP6542, pois dispõe internamente de dois comparadores. A detecção da passagem por zero ocorre sempre que o sinal da entrada não inversora for maior ou igual a 2,5V, quando isto acontece obtém-se uma onda quadrada com duty-cycle de 50%.



Na Figura 4.30 estão representadas as formas de onda correspondentes a passagem por zero da tensão (forma de onda a vermelho) e da corrente (forma de onda a azul) para uma carga indutiva.

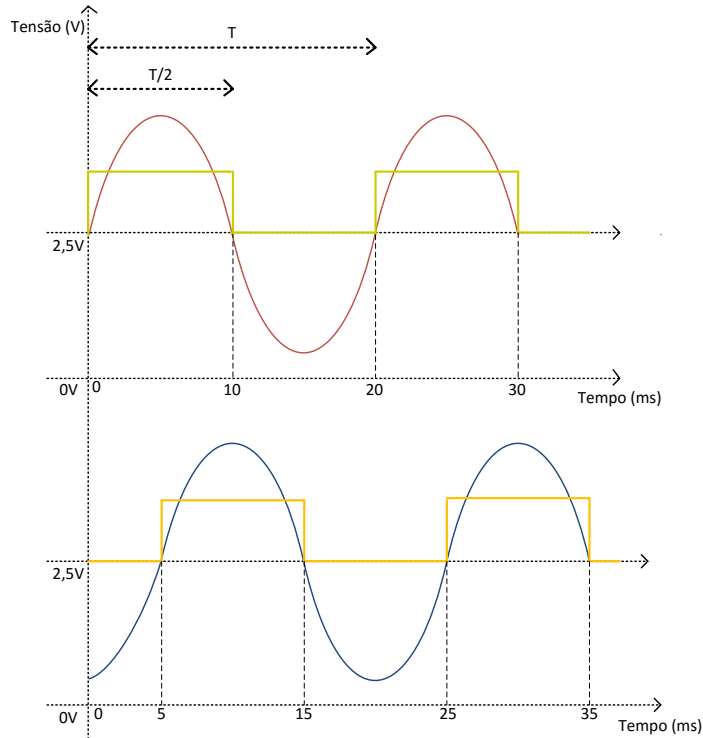


Figura 4.30 – Formas de onda da detecção da passagem por zero da tensão e corrente

4.3.4.6. Circuito detector de Pico

O circuito detector de pico vai permitir detectar a tensão máxima da forma de onda de corrente, esse mesmo valor vai ser convertido pelo conversor analógico do microcontrolador e posteriormente e utilizado para o cálculo do ganho a ser aplicado no PGA.

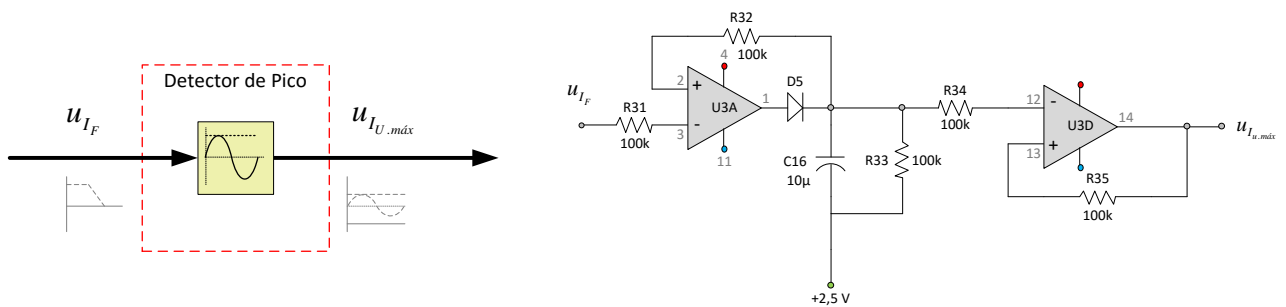


Figura 4.31 – Diagrama de blocos e circuito do detector de pico

4.3.5. Circuitos de Comando e Processamento

4.3.5.1. Microcontrolador PIC18F4520

Este é o elemento principal do sistema de compensação da energia reactiva, visto ser aquele que será responsável pela gestão e processamento de todos os dados, assim como o comando da actuação nas baterias de condensadores.

Para a implementação deste elemento no protótipo utilizou-se um microcontrolador PIC 18F4520 da marca Microchip, a escolha foi feita tendo em conta as necessidades específicas do projecto e aspectos de ordem económica.

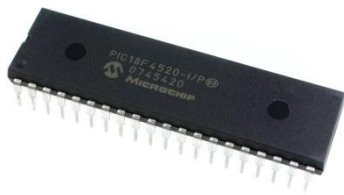


Figura 4.32 – Microcontrolador PIC18F4520



Figura 4.33 – Programador PICKIT3

Estes microcontroladores apresentam como vantagem um funcionamento simples sem a necessidade de muitos componentes nem circuitos auxiliares, permitindo ainda a sua programação no próprio circuito onde vai operar, em termos de características técnicas, o PIC18F420 possui vários módulos bastante úteis para várias aplicações. Para este trabalho destacam-se o módulo do ADC, CAPTURE e do SPI.

Para programar o microcontrolador é necessário utilizar um circuito de interface apropriado que faz a ligação entre ele e o computador. Existem no mercado diversos tipos de programadores. Cada um permite programar alguns tipos de PIC, sendo necessário escolher um que seja adequado para o PIC em questão neste trabalho. Tendo em conta as características de cada programador e também a inevitável questão dos preços, optou-se pela utilização do PICKIT3, uma vez que é de fácil utilização e preço reduzido, o que contribuiu bastante para essa decisão. Este programador é ligado ao computador através da porta USB. A Figura 4.33 seguinte mostra o programador utilizado. Em relação ao software necessário para programar o microcontrolador, utilizou-se o MPLAB IDE para além do programador, é necessário também um software apropriado para se poder desenvolver os programas e enviá-los para o microcontrolador. Utilizou-se o MPLAB IDE que é fornecido pelo fabricante gratuitamente.

Os PIC podem ser programados em linguagem C ou em Assembly. Neste trabalho, optou-se pela programação na linguagem C por ser uma linguagem de alto nível, aumentando a rapidez de implementação. Além disso torna-se mais fácil fazer alterações, uma vez que, o código fica mais perceptível. Para utilizar esta linguagem é necessário ter um compilador adequado para além do MPLAB. Usou-se, para isso, o XC8 versão gratuita.



Será da responsabilidade do microcontrolador converter os sinais analógicos correspondentes a tensão e corrente na carga em sinais digitais que serão processados pelo mesmo, assim como a determinação do desfasamento entre ambos. Permite ainda a comunicação no modo SPI com o dispositivo PGA, no qual existe uma parametrização do valor do ganho a ser aplicado, comunica com um LCD no qual a informação é visualizada, também da responsabilidade do microcontrolador a actuação da ordem de entrada/saída dos bancos de condensadores através da ordem dada ao *driver*.

Tabela 7 – Descrição da função dos pinos utilizados

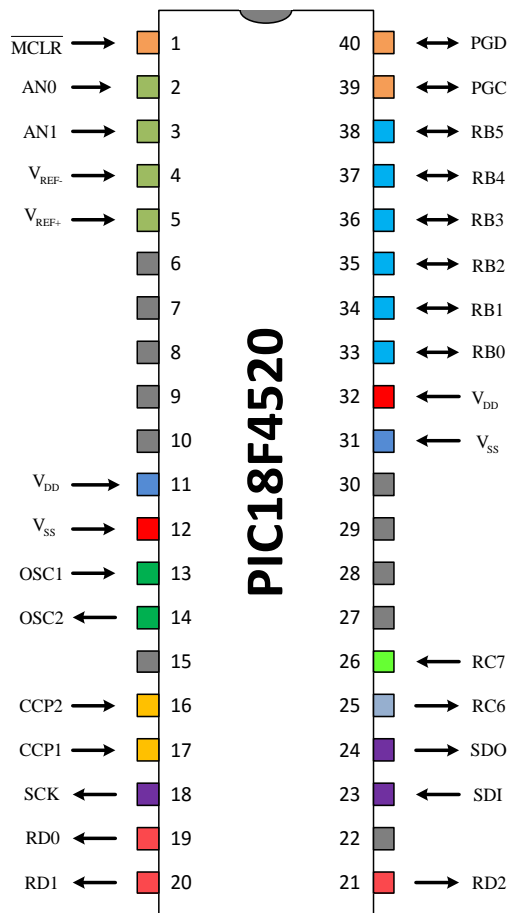


Figura 4.34 – Identificação dos pinos utilizados no μC

Pino	Função
1 - MCLR	Programação do Microcontrolador
2 - AN0	Aquisição ADC da tensão da carga
3 - AN1	Aquisição ADC da corrente da carga
4 - V _{REF-}	Tensão de referência (0 V)
5 - V _{REF+}	Tensão de referência (2,5 V)
11 - V _{DD}	Alimentação do microcontrolador (5V)
12 - V _{SS}	Alimentação do microcontrolador (0V)
13 - OSC1	Oscilador
14 - OSC2	Oscilador
16 - CCP2	Deteccção da passagem por zero da Corrente
17 - CCP1	Deteccção da passagem por zero da Tensão
18 - SCK	Seria Clock (Modo SPI)
19 - RD0	Actuação do 1º Banco de condensadores
20 - RD1	Actuação do 2º Banco de condensadores
21 - RD2	Actuação do 3º Banco de condensadores
23 - SDI	Serial Data In (Modo SPI)
24 - SDO	Serial Data Out (Modo SPI)
25 - RC6	Chip Select (Modo SPI)
26 - RC7	Ligar/desligar da compensação
31 - V _{DD}	Alimentação do microcontrolador (5V)
32 - V _{SS}	Alimentação do microcontrolador (0V)
33 - RB0	Comunicação com LCD (RS)
34 - RB1	Comunicação com LCD (E)
35 - RB2	Comunicação com LCD (DB4)
36 - RB3	Comunicação com LCD (DB5)
37 - RB4	Comunicação com LCD (DB6)
38 - RB5	Comunicação com LCD (DB7)
39 - PGC	Programação do Microcontrolador
40 - PGD	Programação do Microcontrolador

4.3.5.2. LCD (20x4) RT204-1

Para a interface homem-máquina optou-se pela escolha do LCD 20x4 RT204-1 que será o elemento que permitirá ao utilizador visualizar as principais grandezas do sistema, por sua vez, o microcontrolador tratar das tarefas do envio da informação a ser visualizada no LCD.

Este visor de cristal líquido possui quatro linhas com vinte caracteres cada linha, possui uma boa velocidade de comunicação, para a transmissão de dados foi utilizado 4bits de informação.

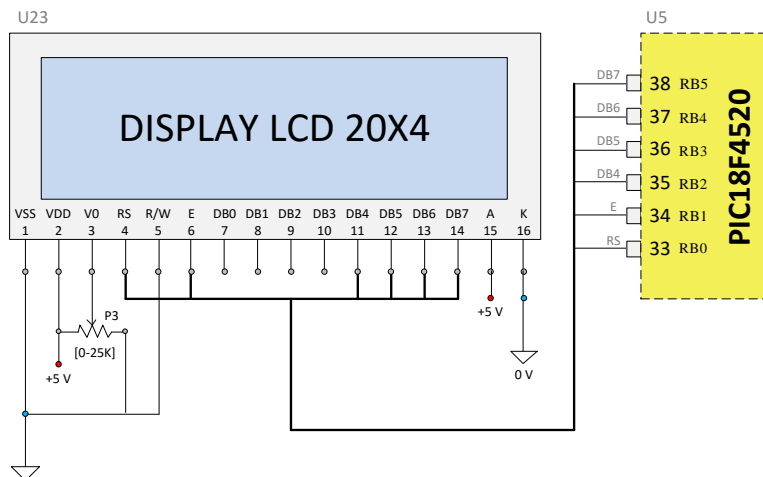


Figura 4.35 – Display LCD 20x4

4.3.6. Circuitos de Disparo dos Mosfet's

Uma vez que as saídas do microcontrolador não podem ser ligadas directamente aos Mosfet's, tornou-se necessário a implementação de um circuito de interface, optou-se pela utilização dos opto-acopladores VO3120, garantindo assim o isolamento galvânico entre a parte de comando e parte de potência e ao mesmo tempo funciona como um *driver*, que permite activar ou desactivar as gates dos Mosfet's.

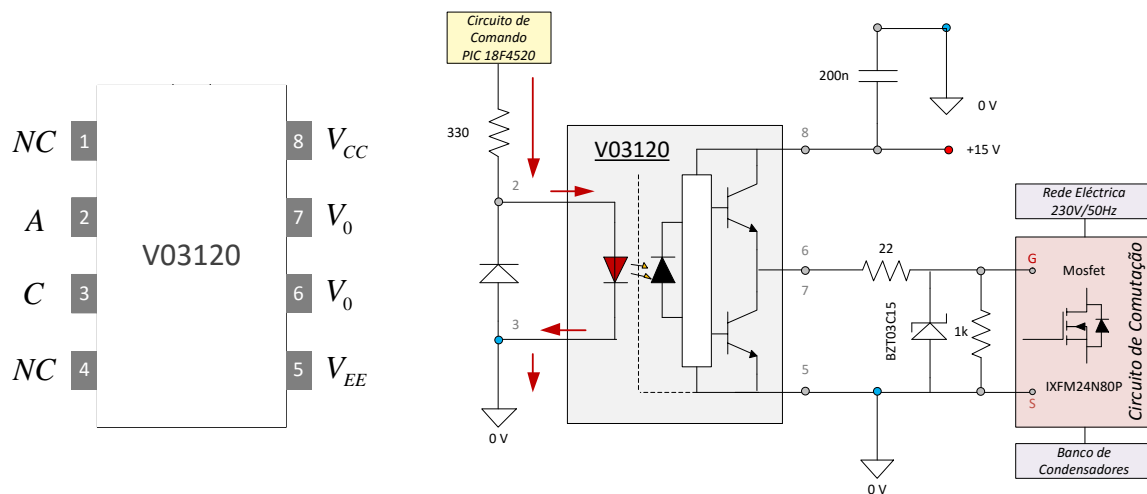


Figura 4.36 – Circuito de Disparo dos Mosfets



4.3.7. Circuitos de Comutação

A parte de potência do SVC é constituída por três módulos de Mosfet's, cada um destes módulos é responsável pela entrada ou saída de serviço de cada um dos bancos-de-condensadores.



Figura 4.37 - Mosfet de Potência IXFM24N80P

O semiconductor interruptor usado para desenvolver os módulos foi o Mosfet de potência IXFM24N80P da marca IXYS, com uma capacidade de bloqueio Dreno-Source até 800V e corrente nominal 24 A RMS. O Mosfet foi dimensionado de acordo que tensão aos terminais dos Mosfet's pode assumir valores que são o dobro da tensão de pico da rede quando estes estão ao corte. Para protecção do dv/dt foi implementado um circuito *snubber*.

Utilizou-se a ponte rectificadora PB3010 de forma a poder direccionar o sentido da corrente na alternância positiva e negativa da rede.



Figura 4.38 - Ponte Rectificadora PB3010

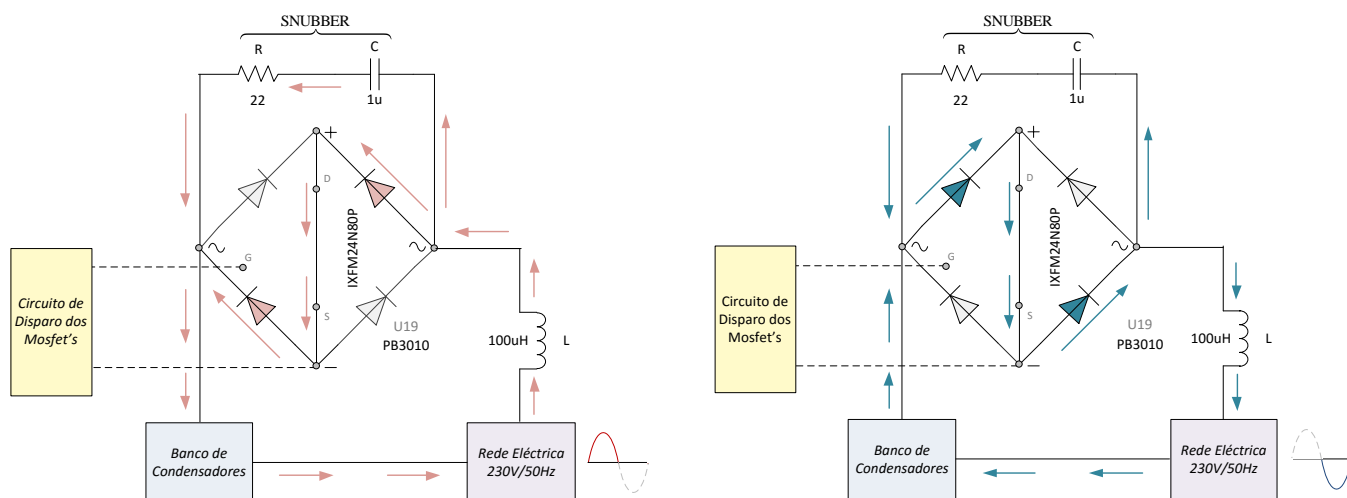


Figura 4.39 – Sentido da corrente nos circuitos de comutação

4.3.8. Circuitos de Compensação

4.3.9. Condensadores

Os condensadores são o equipamento responsável pela produção da potência reactiva capacitiva. No sistema desenvolvido optou-se por utilizar três escalões de compensação distribuídos de acordo com tabela 8, a capacidade total ou equivalente do banco de condensadores é dimensionada em função do valor da potência reactiva a compensar e calcula-se segundo a expressão matemática dada pela equação (4.39).

$$C = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U^2} \quad (4.39)$$

Legenda:

C - Capacidade total equivalente em Farad;

Q - Potência Reactiva Total da instalação;

U – Valor RMS da tensão de alimentação;

f – Frequência da rede eléctrica;

Os escalões da bateria de condensadores encontram-se distribuídos da seguinte forma, Tabela 8.

Tabela 8 – Escalões de Compensação

Escalões de Compensação	1	2	3
Condensadores (uF)	2	5	10
	2	2	5
		1	1
Total (uF)	4	8	16

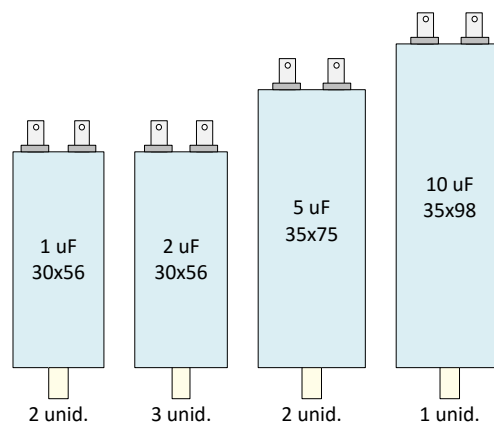


Figura 4.40 – Condensadores de Compensação da Potência Reactiva



4.4. Circuito de carga e descarga dos condensadores

Para que os condensadores fiquem carregados sempre com o valor máximo da tensão, foi necessário adicionar ao sistema um circuito de carga, e um circuito de descarga para garantir que após desligar o sistema estes garantam que apresentem uma tensão inferior a 60V passados 10s.

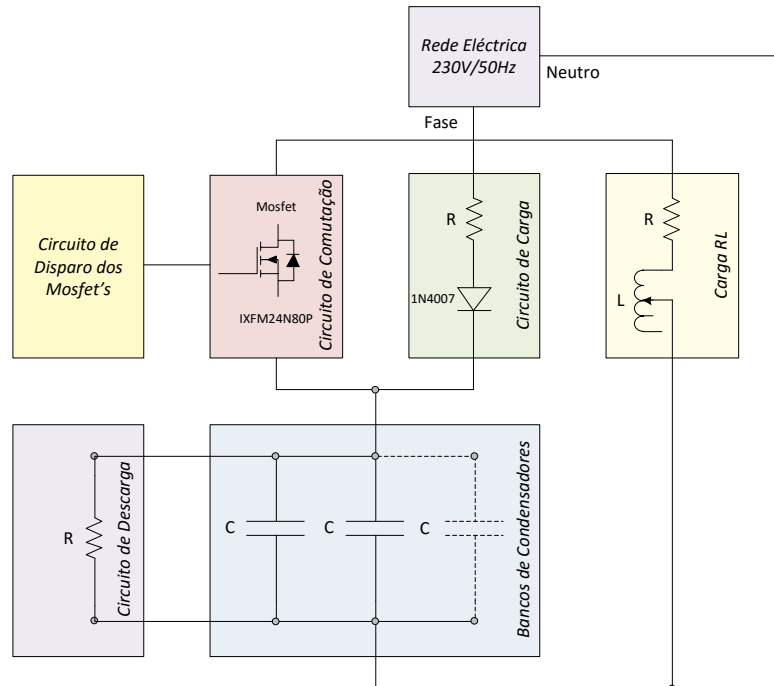


Figura 4.41 – Diagrama de blocos dos circuitos de carga e descarga dos condensadores

4.4.1. Circuitos da Carga RL

Para simulação de uma carga RL foi escolhido um aquecedor para simulação da parte resistiva e uma indutância variável que permite a variação do seu núcleo.

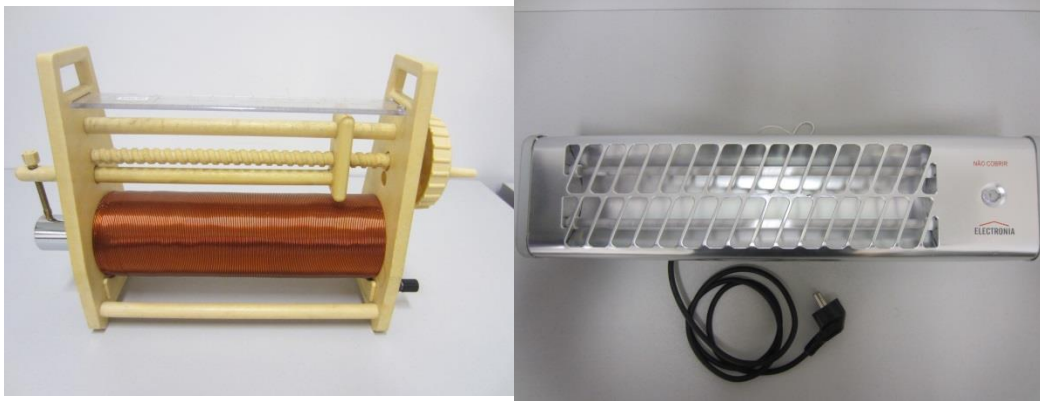


Figura 4.42 – Carga RL



4.5. Implementação do Sistema - Software

Neste capítulo explicar-se-ão todos os algoritmos desenvolvidos para a implementação do sistema de compensação de energia reactiva.

4.5.1. Fluxograma Geral do Sistema de Compensação

Na Figura 4.43 está representado o fluxograma principal do software desenvolvido no microcontrolador onde se pode ver de forma resumida o procedimento utilizado para controlar os processos e rotinas para realizar a compensação da energia reactiva.

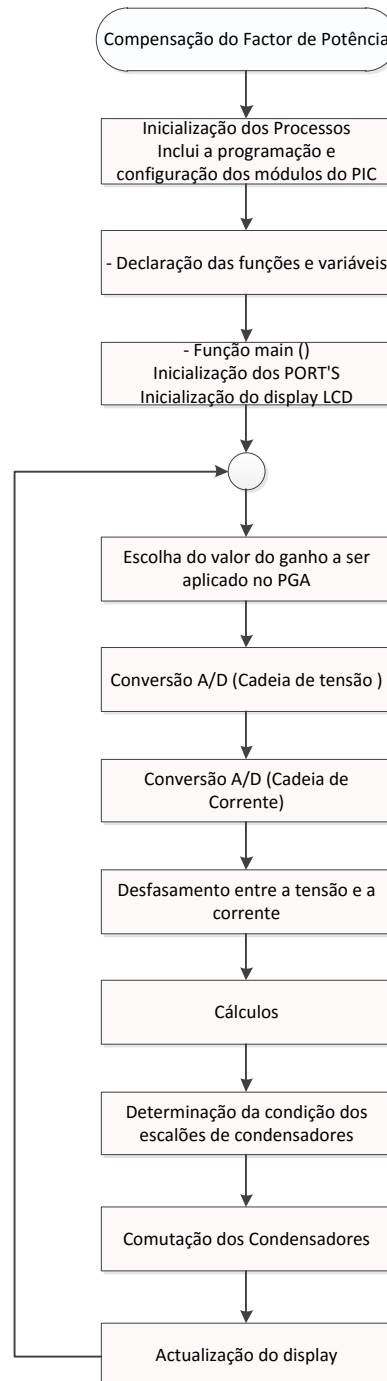


Figura 4.43 – Fluxograma Geral do Funcionamento do Sistema de Compensação

4.5.2. Fluxograma da Identificação do Ganho a ser aplicado no PGA

Na figura 4.44 está representado o fluxograma que permite a identificação do valor do ganho mais adequado, a ser aplicado pelo amplificador de ganho variável (PGA).

O valor da tensão de pico à saída do PGA (U_{OUT}), não pode ultrapassar o valor máximo da tensão de funcionamento do microcontrolador, esta comparação vai permitir verificar qual o melhor ganho a ser aplicado, excluindo aqueles em que esse valor limite seja ultrapassado. Esta escolha tem por base uma comparação, que consiste em multiplicar o valor da tensão $u_{I_{u.máx}}$ (Valor de pico no CH0 do PGA) e pelo valor ganho a escolher, posteriormente é feita a comparação com o valor (2,5).

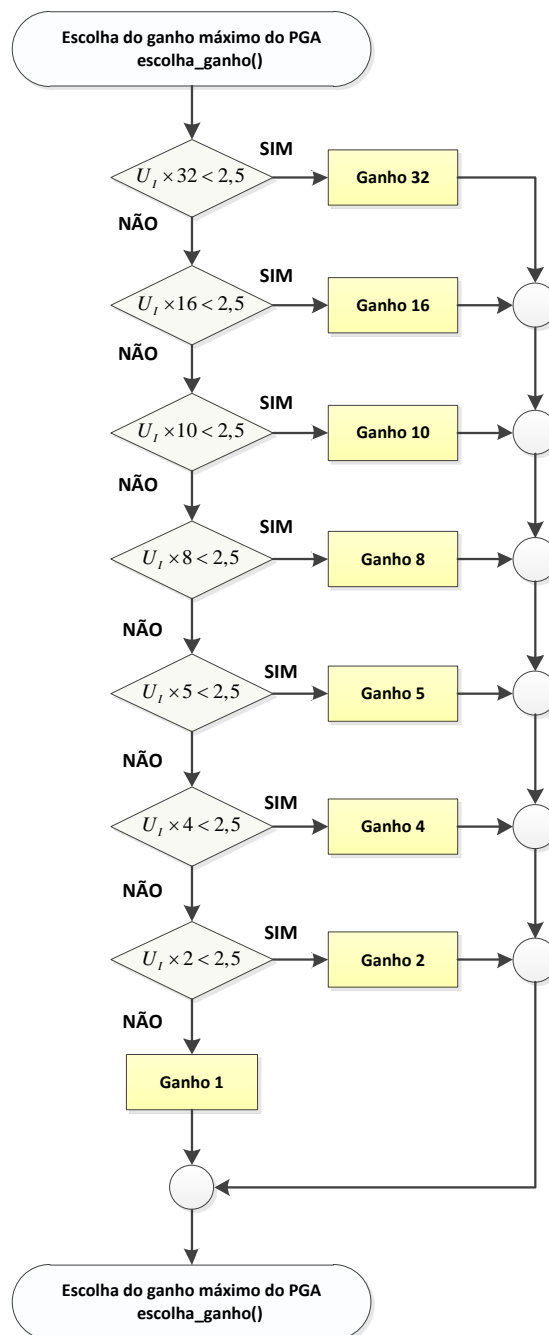


Figura 4.44 - Fluxograma da Identificação do Ganho a ser aplicado no PGA



4.5.3. Fluxograma do cálculo do valor da tensão eficaz da rede

Na Figura 4.45 está representado o fluxograma que permite calcular o valor da tensão eficaz da rede, este processo é efectuado com base na tensão lida pelo conversor A/D no pino AN0 e tendo em conta todos os ganhos na cadeia de condicionamento de sinal.

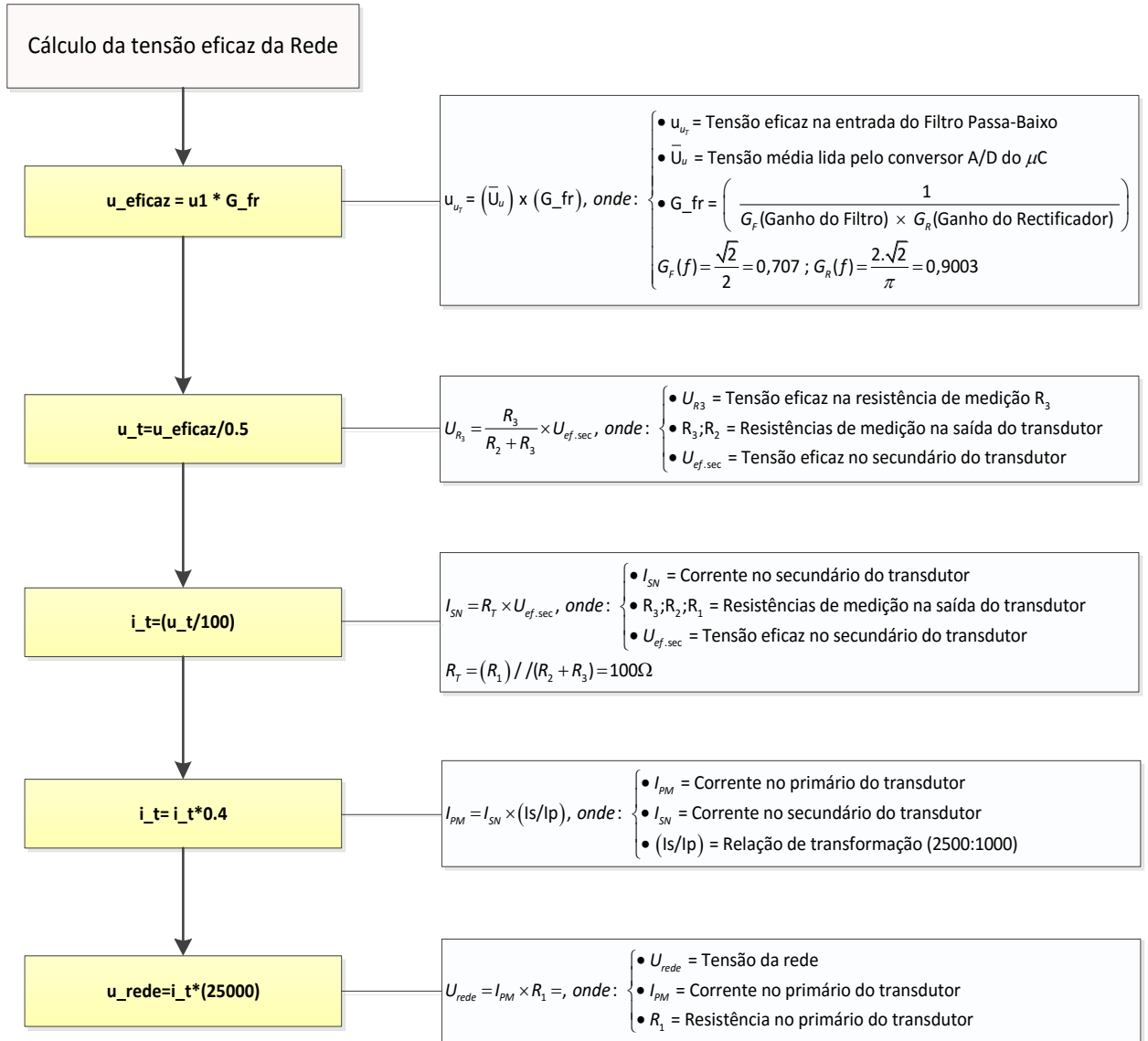


Figura 4.45 - Fluxograma do cálculo do valor da tensão eficaz da rede

4.5.4. Fluxograma do cálculo do valor da corrente eficaz da rede

Na Figura 4.46 está representado o fluxograma que permite calcular o valor da tensão eficaz da rede, este processo é efectuado com base na tensão lida pelo conversor A/D no pino AN1 e tendo em conta todos os ganhos na cadeia de condicionamento de sinal.

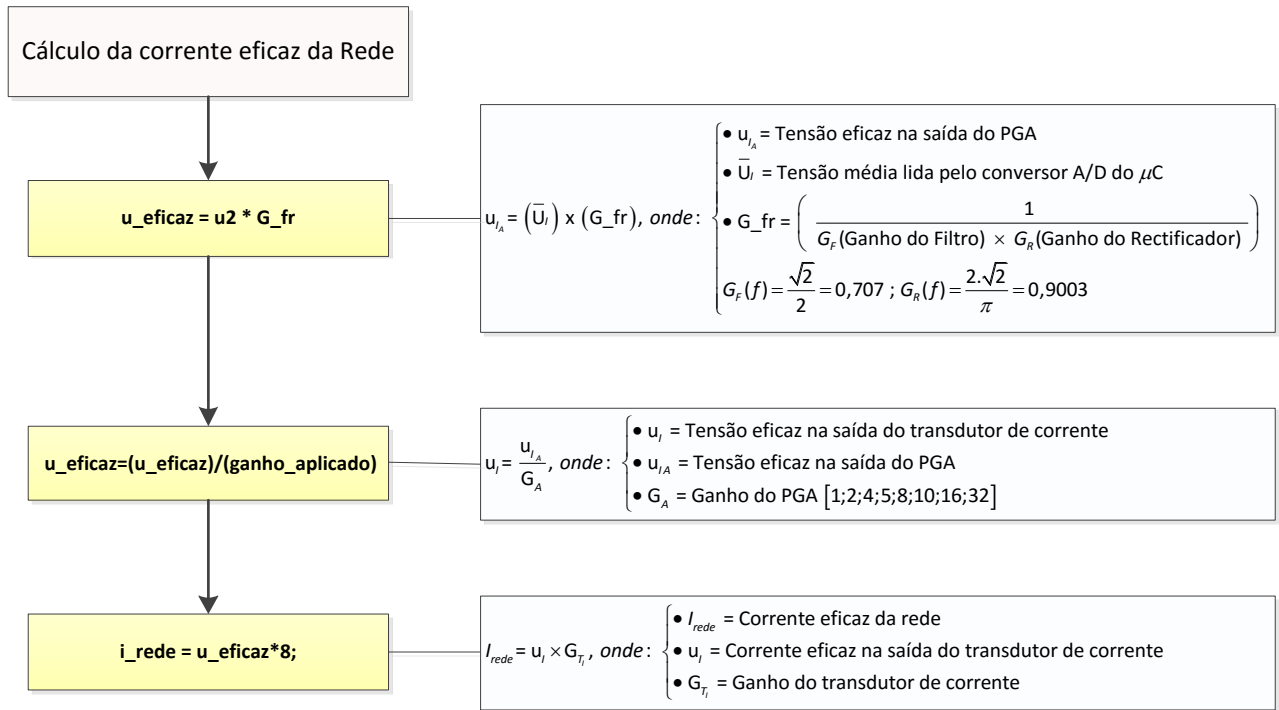


Figura 4.46 – Fluxograma do cálculo do valor da corrente eficaz da rede



4.5.5. Fluxograma do cálculo do desfasamento entre a tensão e corrente

Na figura 4.47 está representado o fluxograma que permite calcular o desfasamento entre a tensão e corrente. Numa primeira fase é feita a conversão da palavra binária (N1) registada pelo CCP1, no valor do período (T), da tensão da rede. Numa segunda fase é feita a identificação do tipo de circuito, se é indutivo ou capacitivo, isto é realizado através da comparação de metade do valor do período (T/2) com o valor registado pelo CCP2 (N2) que contem informação da passagem por zero da corrente.

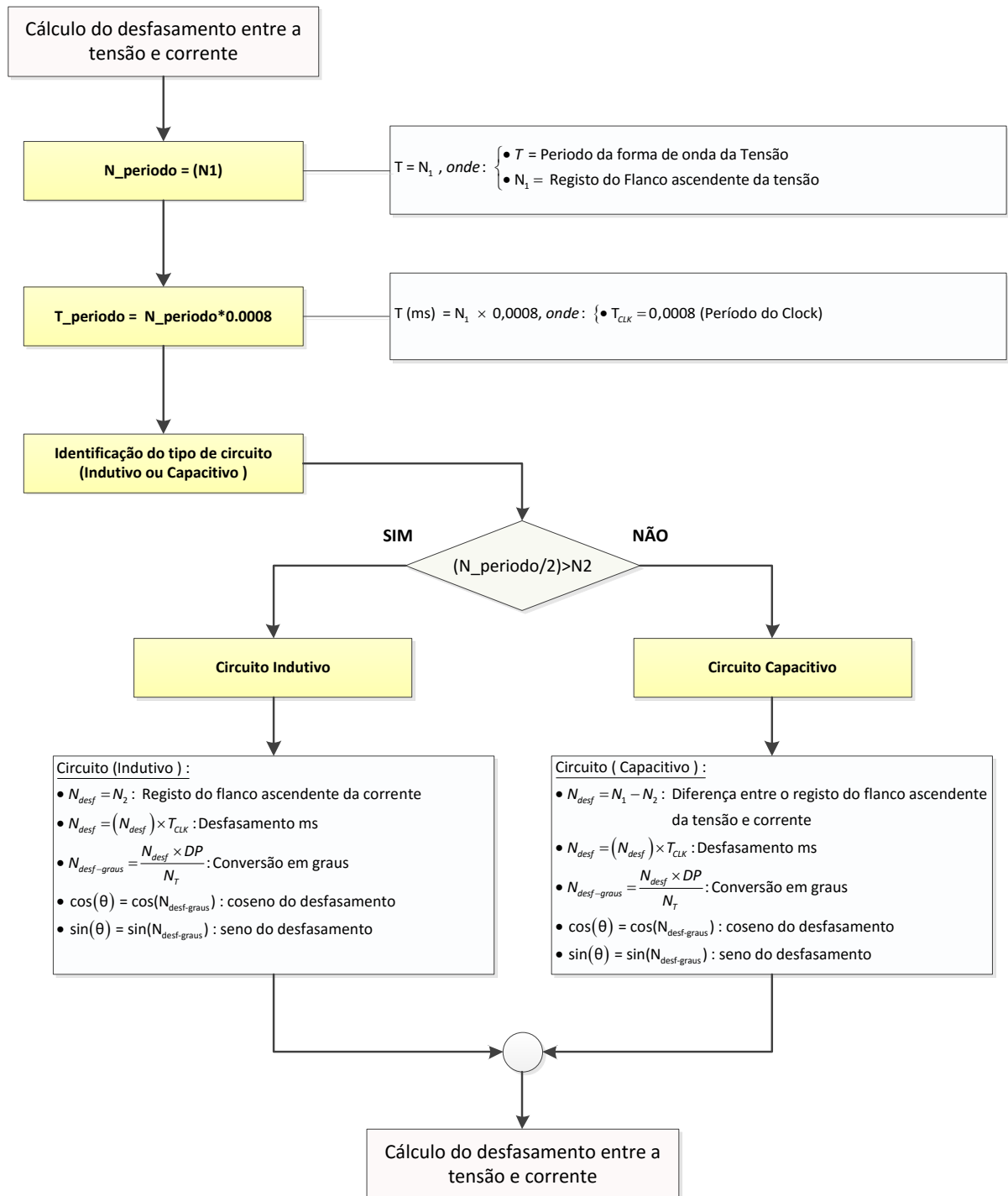


Figura 4.47 – Fluxograma do cálculo do desfasamento entre a tensão e corrente

4.5.6. Fluxograma do cálculo das Potências

Na figura 4.48 está representado o fluxograma do cálculo das potências da carga que vai permitir o cálculo da potência Activa, Reactiva e Aparente.

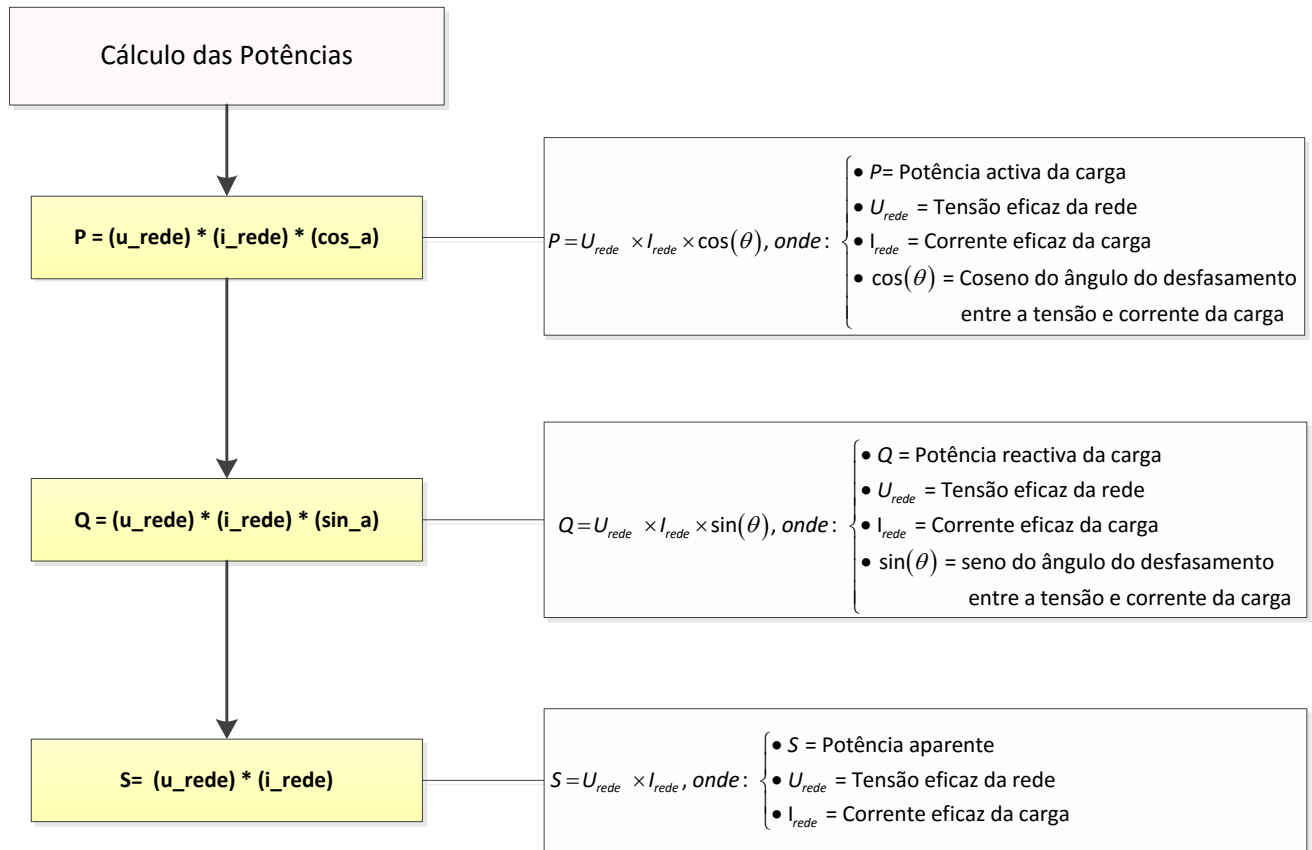


Figura 4.48 - Fluxograma do cálculo das Potências



4.5.7. Fluxograma da determinação da condição dos escalões de condensadores

Na figura 4.49 está representado o fluxograma que vai permitir escolher o estado dos bancos de condensadores, isto é efectuado através do método de aproximações sucessivas que consiste na comparação da energia reactiva indutiva da carga com o valor da energia reactiva capacitiva que poderá ser fornecida por cada um dos bancos, ao adicionar um banco de condensadores o valor total é subtraído pela reactiva desse banco, finalizada a verificação o estado dos bancos ($Q_3; Q_2; Q_1$) poderá ter dois estados 1 e 0 que corresponde a necessidade de ligar ou desligar respectivamente. Teve-se em conta a contribuição que os circuitos snubber's têm na energia reactiva total.

Q_1 – Banco de condensadores de $4\mu\text{F}$

Q_2 – Banco de condensadores de $8\mu\text{F}$

Q_3 – Banco de condensadores de $16\mu\text{F}$

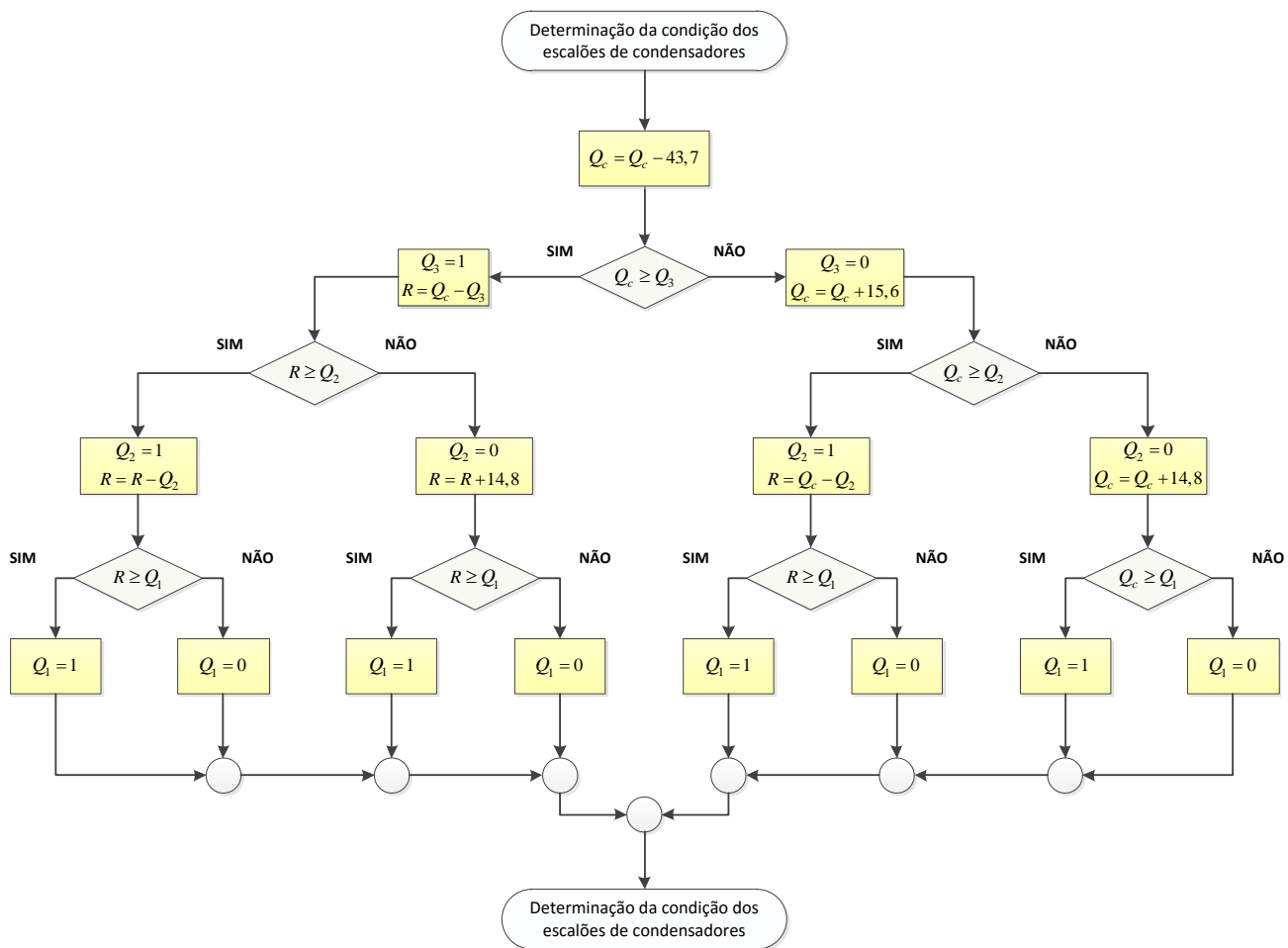


Figura 4.49 - Fluxograma da determinação das condições dos Escalões de Condensadores

4.5.8. Fluxograma da comutação do banco de condensadores

Na figura 4.50 está representado o fluxograma que vai permitir efectuar activação dos bancos de condensadores, através da activação das respectivas saídas. Esta escolha é feita com base na informação proveniente do fluxograma da figura 4.49.

Numa primeira fase é activado o modo CCP1 (Flanco descendente), para verificação da passagem por zero da forma de onda de tensão, segue-se uma temporização de 5 ms para que a comutação seja efectuada no valor máximo da tensão ($U_{rede} = U_{condensadores}$) e assim obter a melhor situação a nível de transitórios que possam ser causados.

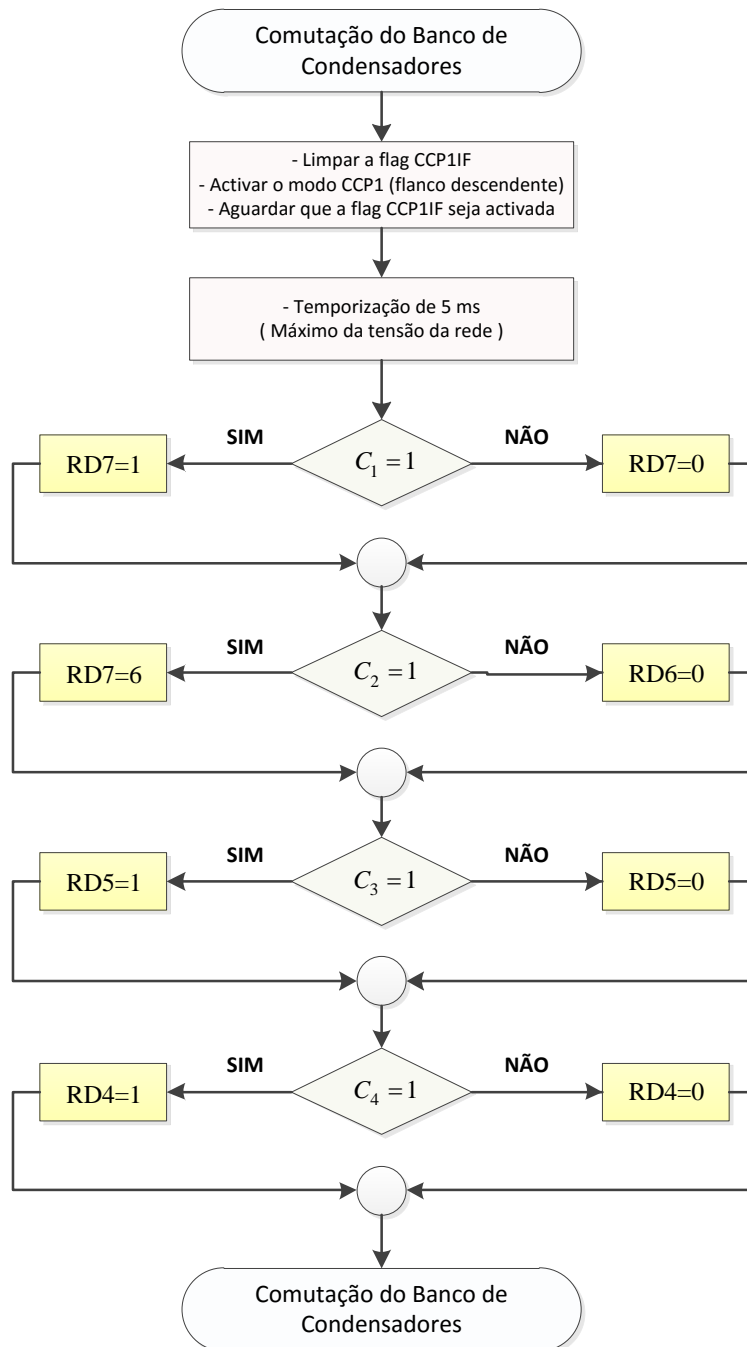


Figura 4.50 - Fluxograma da Comutação dos Bancos de Condensadores



4.5.9. Configuração dos módulos do microcontrolador

4.5.9.1. Configuração do ADC

Existem diversas configurações que podem ser feitas em relação ao módulo conversor analógico-digital, estas opções são escolhidas de acordo com as necessidades do como está estruturado o código e o próprio hardware.

Este módulo permite a conversão de um sinal analógico na entrada num número digital correspondente de 10 bits. O microcontrolador utilizado permite a utilização até 13 entradas (AN0 – AN12), seleccionáveis de entrada de tensão, sendo que no respectivo trabalho apenas foram utilizados três canais.

Diagrama de Blocos do conversor A/D:

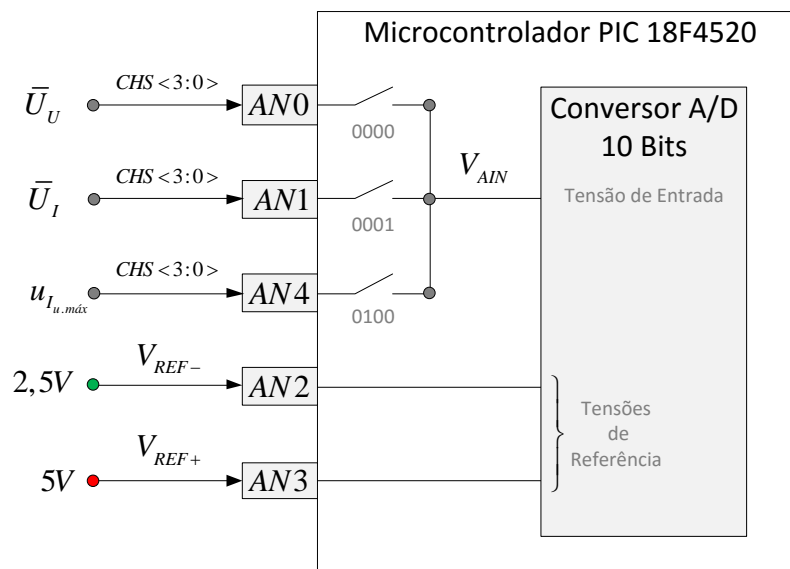


Figura 4.51 - Diagrama de Blocos do Conversor A/D

Etapas para efectuar a conversão A/D:

1. Configurar o módulo A/D
 - Configurar os pinos que serão atribuídos como analógicos e digitais e as tensões de referência (ADCON1)
 - Seleccionar o canal de entrada da tensão analógica a ser convertida (ADCON0)
 - Seleccionar o tempo de aquisição do conversor A/D (ADCON2)
 - Seleccionar o relógio de conversão do conversor A/D (ADCON2)
 - Ligar o módulo A/D (ADCON0)
2. Aguardar o tempo de aquisição necessário
3. Começar a conversão
4. Set GO/DONE bit (ADCON0 register)

Configuração do conversor analógico-digital:

O módulo ADC é constituído por 5 registos que serão parametrizados de acordo com as necessidades do projecto:

ADCON0	Registrador de Controlo 0
ADCON1	Registrador de Controlo 1
ADCON2	Registrador de Controlo 2
ADRESH	Recebe a parte alta do pulso PCM correspondente à amostra convertida
ADRESL	Recebe a parte baixa do pulso PCM correspondente à amostra convertida

Registrador de Controlo 0 – ADCON0

U-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
-	-	CHS3	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	ADON
Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0

(Bit 7-6) - Sem designação, lidos como zero

(Bit 5-2) - CHS<3:0> Selecção do canal analógico

	CHS3-Bit 5	CHS2-Bit 4	CHS1-Bit 3	CHS0-Bit 2
AN0	0	0	0	0
AN1	0	0	0	1
AN4	0	1	0	0

(Bit 1) - GO/DONE: A/D Conversion Status bit when ADON=1

Bit 1 - GO/DONE	
Bit	1 Conversão A/D em progresso
	0 Inactiva

(Bit 0) - ADON: A/D On bit

Bit 0 - ADON	
Bit	1 O modulo conversor A/D está activado
	0 O modulo conversor A/D está desactivado



Registador de Controlo 1 – ADCON1

U-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
-	-	VCFG1	VCFG0	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0
Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0

(Bit 7-6) - Sem designação, lidos como zero

(Bit 5) - VCFG1: Voltage Reference Configuration bit (VREF- source)

Bit 5 - VCFG1		
Bit	1	VREF- (AN2)

(Bit 4) - VCFG0: Voltage Reference Configuration bit (VREF+ source)

Bit 4 – VCFG0		
Bit	1	VREF+ (AN3)

(Bit 3-0) - PCFG<3:0> A/D Port Configuration Control bits

	PCFG-Bit 3	PCFG-Bit 2	PCFG-Bit 1	PCFG-Bit 0
Bit	1	0	1	0

AN12	Digital	AN6	Digital
AN11	Digital	AN5	Digital
AN10	Digital	AN4	Analógica
AN9	Digital	AN3	Analógica
AN8	Digital	AN2	Analógica
AN7	Digital	AN1	Analógica
AN6	Digital	AN0	Analógica

Registador de Controlo 2 – ADCON2

R/W-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
ADFM	-	ACQT2	ACQT1	ACQT0	ADCS2	ADCS1	ADCS0
Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0

(Bit 7) - ADFM: A/D Result Format Select bit

Bit 4 – VCFG0		
Bit	1	Resultado justificado a direita

(Bit 6) - Sem designação, lidos como zero

(Bit 5-3) - ACQT<2:0>: A/D Acquisition Time Select bits

	ACQT2-Bit 5	ACQT1-Bit 4	ACQT0-Bit 3
Bit	0	1	0
4 TAD			

(Bit 2-0) - ADCS<2:0>: A/D Conversion Clock Select bits

	ADCS2-Bit 2	ADCS1-Bit 1	ADCS0-Bit 0
Bit	1	1	0
FOSC/64			



4.5.9.2. Configuração do módulo Capture

O microcontrolador pic18f4520 dispõe de dois módulos CCP (Capture/Compare/PWM), cada modulo contem um registo de 16 bits.

No modo de captura, o par de registos CCPxH e CCPxL captam o valor de 16 bits do registo TMR1, quando acontece um evento no pino CCPx. Os eventos neste caso são as transições que acontecem em cada flanco ascendente resultado da passagem por zero da tensão e corrente.

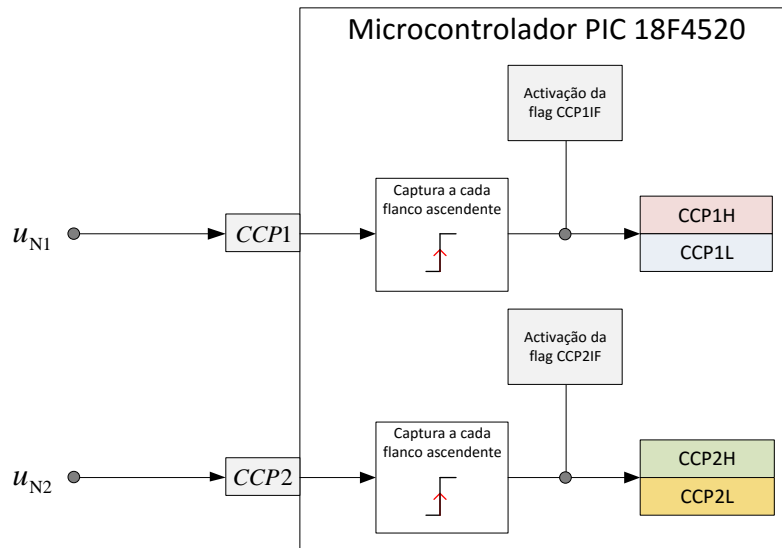


Figura 4.52 - Esquema do módulo Capture

Um evento é definido como um dos seguintes

U-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
-	-	DCxB1	DCxB1	CCPxM3	CCPxM2	CCPxM1	CCPxM0
Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0

(Bit 7-6) - Sem designação, lidos como zero

(Bit 5-4) - DCxB<1:0>: PWM Duty Cycle bit 1 and bit 0 for CCPx Module

No modo Capture não é utilizado

(Bit 3-0) - CCPxM<3:0>: CCPx Module Mode Select bits

	CCPxM3- Bit 3	CCPxM2-Bit 2	CCPxM1- Bit 1	CCPxM0-Bit 0
Bit	0	1	0	1
Modo Capture a cada flanco ascendente				

4.5.9.3. Configuração do módulo SPI

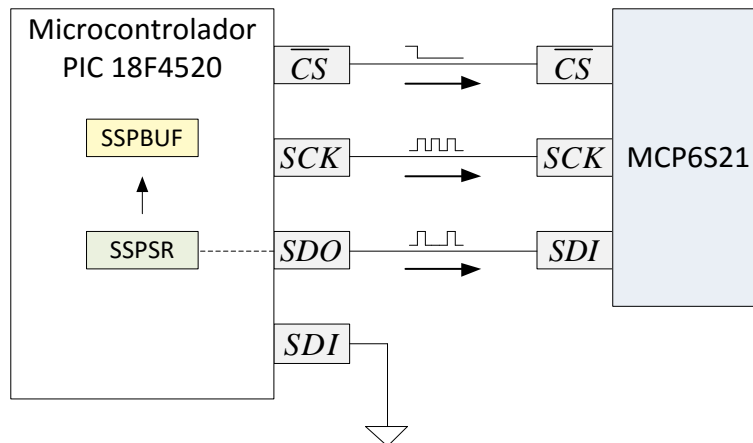


Figura 4.53 - Esquema do módulo SPI

Protocolo SPI

O protocolo SPI é um modo de comunicação full-duplex, trabalha com a filosofia mestre-escravo, adequado em aplicações nas quais se deseja transferir fluxos de dados, no sistema é utilizado para a comunicação com o dispositivo MCP6S21 (Amplificador de ganho variável), permitindo assim a configuração do ganho aplicado de acordo com as necessidades do sistema de aquisição. O barramento SPI é composto por três linhas: serial data out (SDO), serial data in (SDI), serial clock (SCK) e um quarto sinal \overline{CS} que é utilizado como chip select.

A SDO é a linha de dados de saída, responsável por transmitir a mensagem de dados que vai ser transmitida ao dispositivo, enquanto que a linha SDI é a linha de entrada de dados que no sistema encontra-se ligada a massa uma vez que o dispositivo não envia dados para o microcontrolador.

Na linha SCK é aplicado o sinal clock que sincroniza a transmissão dos dados. O chip select é utilizado para a selecção do dispositivo, serve para o dispositivo saber que vai receber dados.

Modo de operação do Modo SPI

Para configurar o modo SPI é necessário efectuar as configurações mostradas a seguir alterando o conteúdo dos registadores SSPCON1 e o SSPSTAT.

- Modo mestre (pino SCK é a saída do clock)
- Modo escravo (pino SCK é a entrada do clock)
- Polaridade do clock (estado ocioso do clock)
- Fase de amostragem do dado de entrada (na metade ou no final do tempo de saída do bit)
- Borda do clock (saída do bit na borda de subida ou de descida do clock)
- Frequência do clock (modo mestre somente)



- Selecção do modo escravo (modo escravo somente)

A interface SPI utiliza dois registradores na comunicação. São eles o registrador de deslocamento SSPSR e o registrador SSPBUF. O SSPSR é o registrador que, na transmissão, coloca os bits no pino SDO e, na recepção, recebe os bits que chegam ao pino SDI. Tanto na transmissão, quanto na recepção o primeiro bit que entra ou sai é o mais significativo (MSb).

Registrador de Controlo – SSPSTAT

R/W-0	R/W-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0
SMP	CKE ⁽¹⁾	D/\bar{A}	P	S	R/\bar{W}	UA	BF
Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0

(Bit 7) – SMP: Sample bit

Bit 7 – SMP		
Bit	1	Input data sampled at end of data output time

(Bit 6) – CKE: SPI Clock Select bit(1)

Bit 6 – CKE		
Bit	1	Transmit occurs on transition from active to Idle clock state

(Bit5) – (D/\bar{A}): *Data/Address* bit

No modo SPI não é utilizado

(Bit 4) – P: Stop bit

No modo SPI não é utilizado

(Bit 3) – S: Start bit

No modo SPI não é utilizado

(Bit 2) - (R/\bar{W}): *Read/Write* information

No modo SPI não é utilizado

(Bit 1) – UA: Update Address bit

No modo SPI não é utilizado

(Bit 0) – BF: Buffer Full Status bit (Receive mode only)

Bit 0 – BF		
Bit	0	Receive not complete, SSPBUF is empty

Registrador de Controllo – SSPCON1

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
WCOL	SSPOV ⁽¹⁾	SSPEN ⁽²⁾	CKP	SSPM3 ⁽³⁾	SSPM2 ⁽³⁾	SSPM1 ⁽³⁾	SSPM0 ⁽³⁾
Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0

(Bit 7) – WCOL: Sample bit

Bit 7 – WCOL		
Bit	0	No collision

(Bit 6) - SSPOV: Receive Overflow Indicator bit⁽¹⁾

Bit 6 – SSPOV		
Bit	0	No overflow

(Bit 5) - SSPEN⁽²⁾: Master Synchronous Serial Port Enable bit

Bit 5 – SSPEN ⁽²⁾		
Bit	1	Enables serial port and configures SCK, SDO, SDI and SS as serial port pins

(Bit 4) – CKP: Clock Polarity Select bit

Bit 4 – CKP		
Bit	0	Idle state for clock is a low level

(Bit 3-0) – SSPM<3:0>: Master Synchronous Serial Port Mode Select bits⁽³⁾

	SSPM3-Bit 3	SSPM2-Bit 2	SSPM1-Bit 1	SSPM0-Bit 0
Bit	0	0	1	0
SPI Master mode, clock = FOSC/64				



5. Resultados experimentais

Após a descrição do funcionamento do MSC (Mosfet Switch Capacitor), neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais que permitem calcular as principais grandezas da carga, assim como as situações de antes e após de efectuar a compensação da potência reactiva. O registo dos resultados foi efectuado pela comparação dos valores dados pelo display LCD (figura 5.2) do sistema MSC e os indicados pelo analisador de rede TM39 da marca ZES ZIMER (figura 5.1). Para registo das formas de onda foi utilizado o Osciloscópio TDS2020B da marca Tektronix (figura 5.3).



Figura 5.1 - TM39



Figura 5.2 - Display LCD

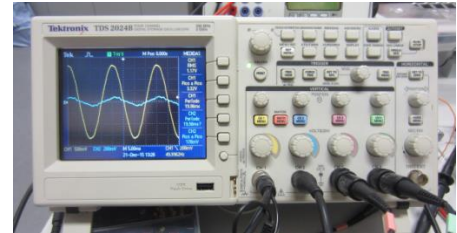


Figura 5.3 - Osciloscópio

5.1. Aquisição da Tensão da Rede

Na figura 5.4 pode ser visualizado as formas de onda da tensão da rede (U_{rede}) e a tensão na resistência de medição (u_{U_A}):

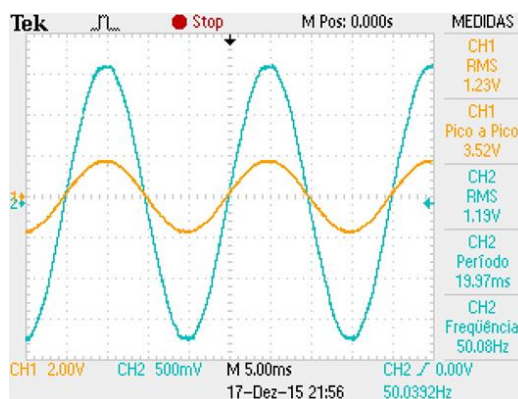


Figura 5.4 – Resistência de medição (Tensão da Rede)

CH1: Tensão na resistência de medição (u_{U_A})

CH2: Tensão da rede (U_{rede})

Sendo o ganho da ponta de prova de tensão 200, temos:

$$U_{rede} = 1,19 \times (200) = 238 V$$

Na figura 5.5 pode ser visualizado a filtragem do sinal (u_{U_A}), é possível verificar que o filtro impõe um atraso de 180° , e uma atenuação devido ao ganho aplicado de acordo com a equação (5.1), resultando na tensão (u_{U_F}):

$$G(f_c) = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707 \quad (5.1)$$

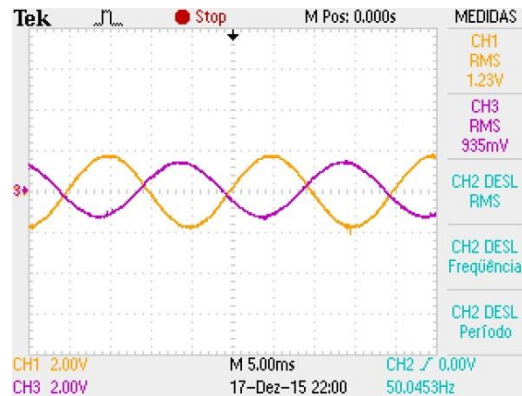


Figura 5.5 – Filtro Passa-Baixo (Tensão da Rede)

CH1: Tensão na resistência de medição (u_{U_A})

CH3: Tensão na saída do Filtro Passa Baixo (u_{U_F})

Na figura 5.6 pode ser visualizado a tensão na saída do rectificador de precisão (\bar{U}_U) que é dado pela equação (5.2).

$$G(f_r) = \frac{2 \cdot U_p}{\pi} \quad ; \quad u_p = \sqrt{2} \cdot U_{ef} \quad (5.2)$$

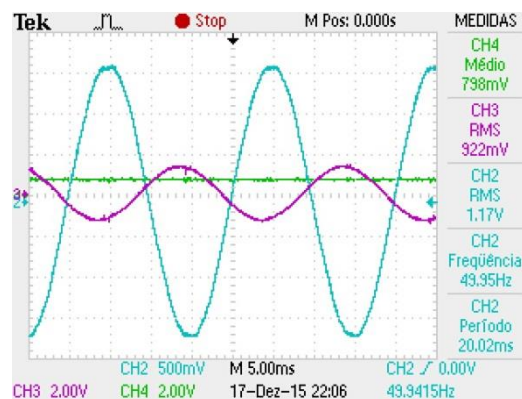


Figura 5.6 – Valor Médio (Tensão da Rede)

CH2: Tensão da rede (U_{rede})

CH3: Tensão na saída do Filtro Passa Baixo (u_{U_F})

CH4: Tensão na saída do Rectificador de Precisão (\bar{U}_U)



5.2. Aquisição da Corrente da Carga

Na figura 5.7 pode ser visualizado as formas de onda da corrente da carga (I_{carga}) e a tensão na saída do transdutor de corrente (u_{IT}):

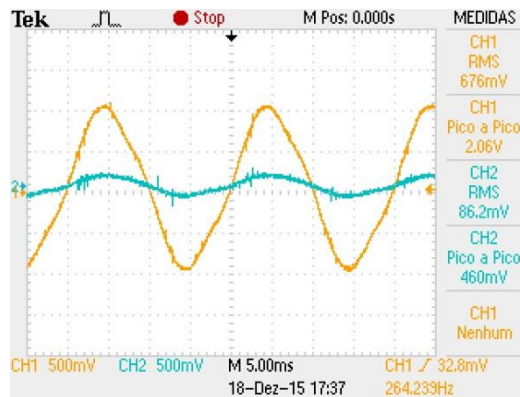


Figura 5.7 – Tensão no secundário do transdutor (Corrente da Carga)

CH1: Corrente da Carga (I_{carga})

CH2: Tensão à saída do Transdutor de Corrente (u_{IT})

Na figura 5.5 pode ser visualizado a filtragem do sinal (u_{IA}), tal como no caso da aquisição da tensão da rede é possível verificar que o filtro impõe um atraso de 180° e uma atenuação devido ao ganho aplicado, de acordo com a equação (5.3) resultando na tensão (u_{IF}).

$$G(f_c) = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707 \quad (5.3)$$

No caso da corrente da carga que apresenta alguma distorção, é possível verificar que a filtragem do sinal permite uma melhoria na forma de onda.

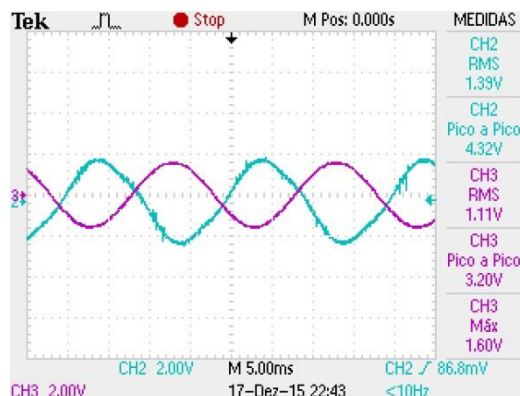


Figura 5.8 - Filtro Passa-Baixo (Corrente da Carga)

CH2: Tensão à saída do PGA (u_{IA})

CH3: Tensão à saída do Filtro Passa Baixo (u_{IF})

Na figura 5.9 pode ser visualizado a tensão na saída do rectificador de precisão (\bar{U}_I).

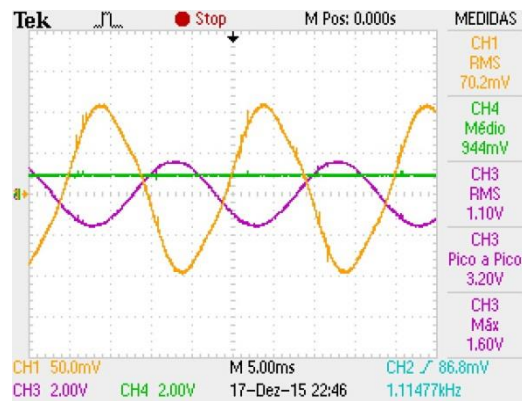


Figura 5.9 - Valor Médio (Corrente da Carga)

- CH1:** Corrente da Carga (I_{carga})
- CH3:** Tensão à saída do Filtro Passa Baixo (u_{IF})
- CH4:** Tensão à saída do Rectificador de Precisão (\bar{U}_I)

5.3. Aquisição da defasagem entre a tensão e a corrente e verificação do momento da ordem de comando para a comutação dos Bancos de Condensadores

Na figura 5.10 encontra-se representado formas de onda da passagem por zero da tensão e corrente da carga para um defasamento igual a 2,4 ms.

Na figura 5.11 verifica-se que a ordem para entrada ao serviço dos bancos de condensadores, ocorre no valor máximo da tensão da rede, esta situação vai permitir minimizar as perturbações causadas pela comutação dos bancos.

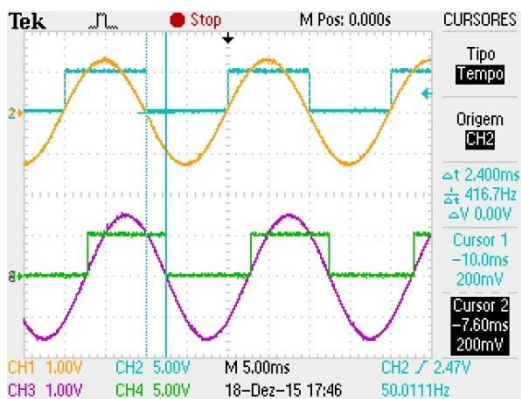


Figura 5.10 - Defasamento entre a tensão e a corrente

- CH1:** Tensão na saída do Filtro Passa-Baixo (u_{UF})
- CH2:** Tensão na saída do comparador (u_{N1})
- CH3:** Tensão na saída do Filtro Passa Baixo (u_{IF})
- CH4:** Tensão na saída do comparador (u_{N2})

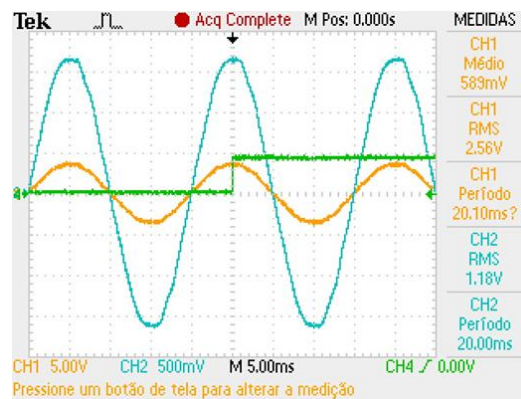


Figura 5.11 - Momento da activação dos bancos

- CH1:** Tensão à saída do Filtro Passa Baixo (u_{UF})
- CH2:** Tensão da rede (U_{rede})
- CH4:** Tensão de comando da activação do B.C



5.4. Compensação da Potência Reactiva

5.4.1. Validação das grandezas obtidas pelo sistema MSC

Para poder validar o sistema de aquisição proposto fez-se um registo de todas as grandezas dadas pelo sistema de compensação MSC e a comparação com os valores dados pelo analisador de Rede, tabela 9.

Uma vez que o analisador de rede encontra-se instalado antes dos condensadores para poder desprezar a contribuição dos circuitos de protecção dos Mosfets (*snubber's*), foi instalado um interruptor B3.

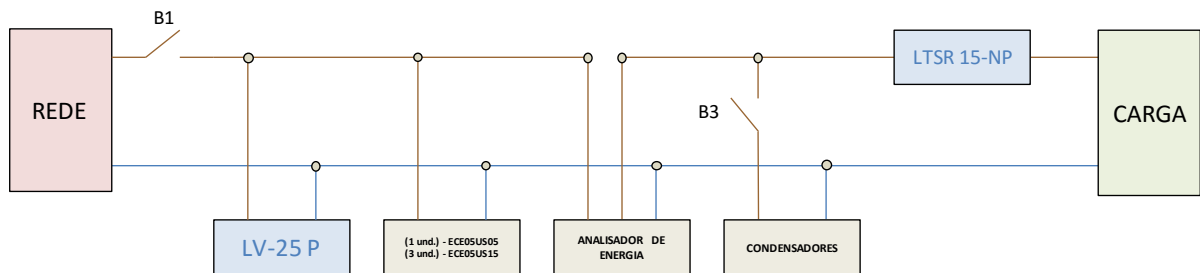


Figura 5.12 – Disposição dos equipamentos de medição

Tabela 9 - Registo dos valores dados pelo Sistema MSC e o Analisador de rede

L(H)	Sistema de Compensação (MSC)						Analisador de Rede						Osciloscópio
	I(A)	U(V)	cos φ	P(W)	Q(var)	S (VA)	I(A)	U(V)	F.P	P(W)	Q(var)	S (VA)	Def. (ms)
1,2	0,69	237,0	0,64	103,9	113,4	163,1	0,69	236,8	0,65	106,6	125,7	165,0	2,84
1,1	0,74	237,8	0,64	111,9	121,8	175,4	0,73	238,2	0,65	113,3	132,5	174,3	2,76
1	0,80	238,5	0,66	125,7	131,7	192,1	0,79	237,8	0,66	123,6	140,1	187,2	2,72
0,9	0,84	239,9	0,67	138,2	137,6	204,4	0,85	238,1	0,67	136,8	150,0	203,2	2,64
0,8	0,90	237,8	0,69	147,3	142,6	215,2	0,92	237,7	0,69	150,6	159,3	218,7	2,56
0,7	1,05	235,5	0,70	175,4	151,6	251,0	1,03	238,0	0,72	174,4	171,5	244,4	2,52
0,6	1,15	237,0	0,73	199,9	158,6	275,6	1,14	237,9	0,74	200,1	182,4	271,0	2,4
0,5	1,29	237,8	0,77	233,7	167,7	305,1	1,27	237,5	0,77	232,2	192,2	301,5	2,2
0,4	1,41	237,8	0,80	276,9	176,3	343,5	1,41	237,3	0,80	269,1	201,3	336,1	2,04
0,3	1,62	235,5	0,84	320,4	178,1	381,4	1,57	235,5	0,84	308,9	203,9	370,2	1,88
0,2	1,84	235,5	0,89	398,9	178,7	447,9	1,83	235,5	0,89	383,7	198,1	432,7	1,52

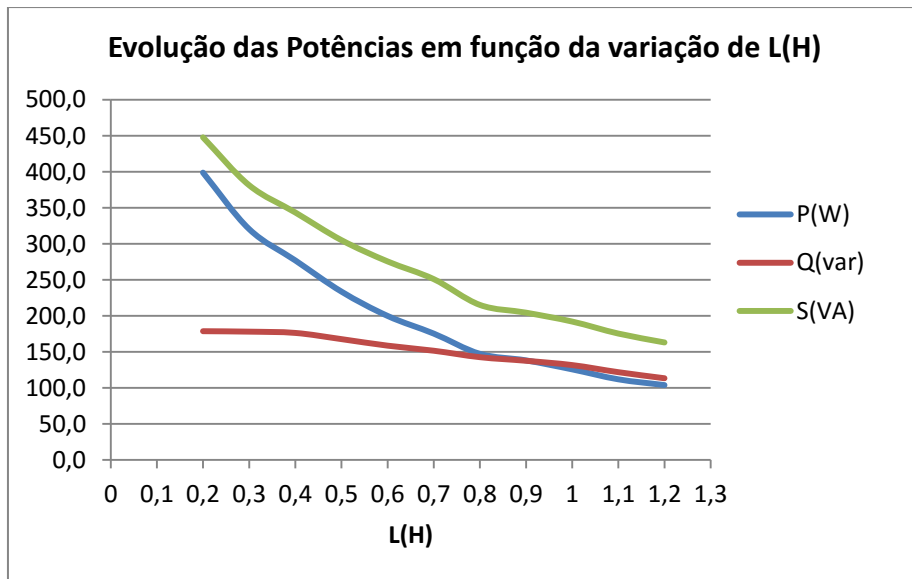


Figura 5.13 - Evolução das Potências em função da variação de L(H)



5.4.2. Compensação do Factor de Potência

5.4.2.1. Carga Indutiva com $L = 1,1\text{ H}$

Na figura 5.14 encontra-se representado formas de onda da tensão e corrente da carga, para um valor da indutância variável de $L=1,1\text{ H}$, traduzindo-se num $\cos \varphi = 0,65$. Após ligar a compensação o sistema activou o 1º escalão de compensação (capacidade total = $4\mu\text{F}$), na figura 5.15 encontra-se representado as formas de onda da tensão e corrente da carga.

É possível verificar a compensação do factor de potência uma vez que o deslocamento entre a tensão e corrente foi corrigido, de acordo com os valores da tabela 10, o sistema passou a ter um $FP = 0,96$. A distorção da forma de onda deve-se ao facto de os condensadores amplificarem as harmónicas presentes na tensão, o que resulta em harmónicas de corrente elevadas, esta situação é mais visível uma vez que o valor da corrente é muito reduzido.

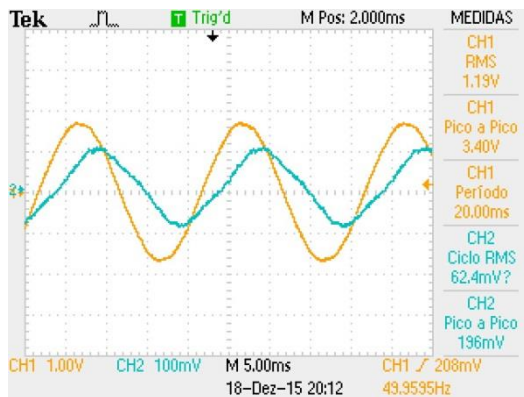


Figura 5.14 - Compensação “Desligada” com $L=1,1\text{H}$

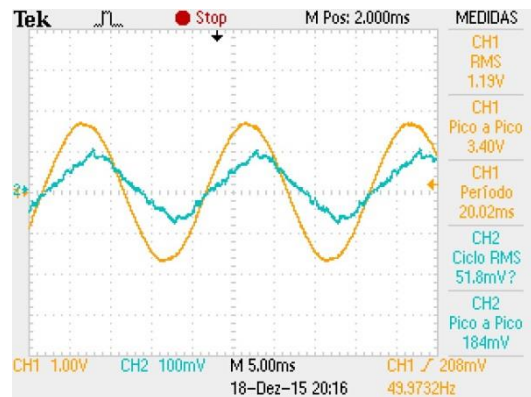


Figura 5.15 - Compensação “Ligada” com $L=1,1\text{H}$

CH1: Tensão da rede (U_{rede})
 CH2: Corrente da rede (I_{rede})

Tabela 10 - Valores Registados do Analisador de Rede para $L = 1,1\text{ H}$

	Analisador de Rede
I(A)	0,51
U(V)	239,5
FP	0,963
P(W)	118,6
Q(var)	32,89
S(VA)	122,9

5.4.2.2. Carga Indutiva com $L = 0,4 \text{ H}$

Na Figura 5.16 encontra-se representado formas de onda da tensão e corrente da carga, para um valor da indutância variável de $L=0,4 \text{ H}$, traduzindo-se num $\cos \varphi=0,80$. Após ligar a compensação o sistema activou o 2º escalão de compensação (capacidade total = $8\mu\text{F}$), na figura 5.17 encontra-se representado as formas de onda da tensão e corrente da carga.

É possível verificar a compensação do factor de potência uma vez que o deslocamento entre a tensão e corrente foi corrigido, de acordo com os valores registados pelo Analisador de Rede, tabela 8, o sistema passou a ter um $\text{FP}=0,99$.

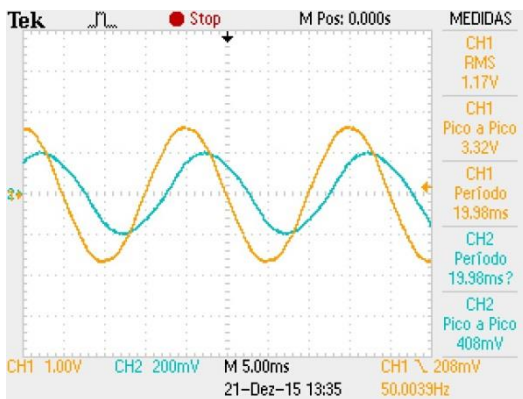


Figura 5.16 -Compensação Desligada com $L=0,4\text{H}$

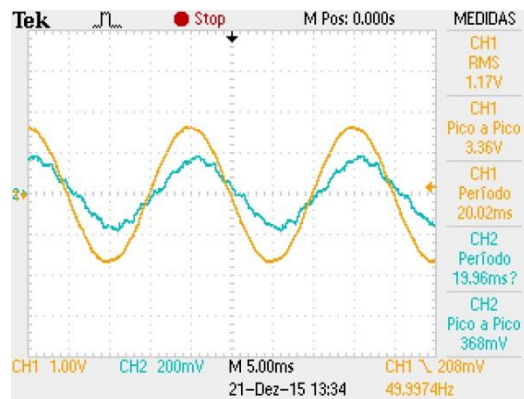


Figura 5.17 - Compensação “Ligada” com $L=0,4\text{H}$

CH1: Tensão da rede (U_{rede})
CH2: Corrente da rede (I_{rede})

Tabela 11 - Valores Registados do Analisador de Rede para $L = 0,4 \text{ H}$

	Analizador de Rede
I(A)	1,11
U(V)	235,9
FP	0,99
P(W)	256,1
Q(var)	36,29
S(VA)	259,6



5.4.2.3. Factor de Potência em função da variação de L(H)

Para comprovação da capacidade de compensação da Potência Reactiva foi efectuado o registo das variações de $L(H)$ e respectivos valores do $\cos \phi$ (indicado pelo sistema de compensação), e o FP (indicado pelo analisador de rede).

L(H)	$\cos \phi$	FP	Escalão ao serviço
1,2	0,64	0,97	4 μF
1,1	0,65	0,80	4 μF
1	0,66	0,96	4 μF
0,9	0,67	0,84	4 μF
0,8	0,69	0,94	4 μF
0,7	0,71	0,93	4 μF
0,6	0,74	0,93	4 μF
0,5	0,77	0,93	4 μF
0,4	0,8	0,99	8 μF
0,3	0,83	0,99	8 μF
0,2	0,89	1,00	4 μF

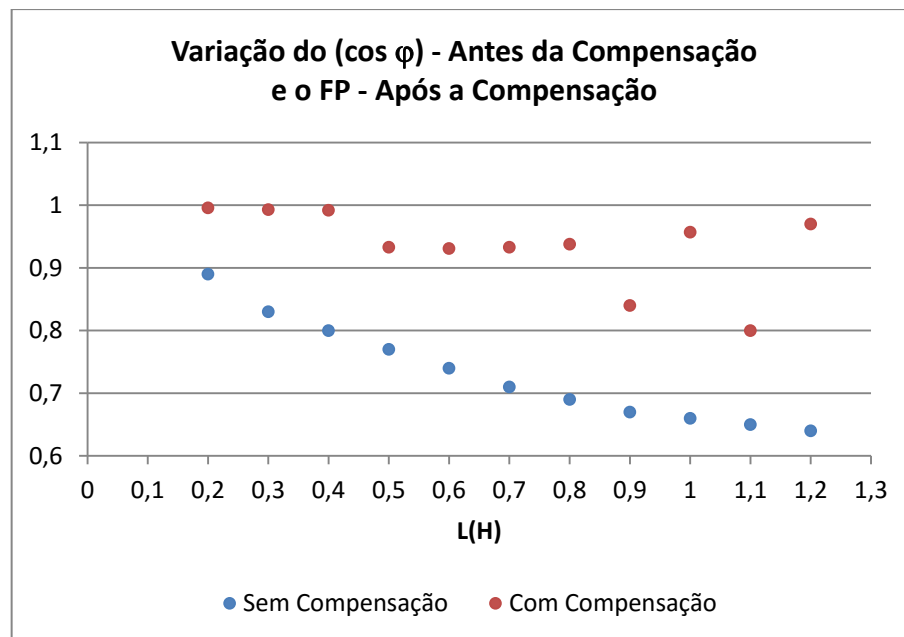


Figura 5.18 – Variação do $\cos \phi$ (sem compensação) e do FP (com compensação)

6. Conclusões

Neste capítulo é apresentado as conclusões desta dissertação, analisando-se o resultado final e o cumprimento dos objectivos propostos inicialmente.

Esta dissertação reflecte um trabalho teórico e prático relativamente ao estudo da compensação do factor de potência. Um dos principais objectivos foi cumprido com o desenvolvimento de um sistema capaz de medir as grandezas eléctricas de uma carga indutiva e efectuar a sua compensação de forma automática, recorrendo a um banco de condensadores em paralelo com a carga. Relativamente as perturbações criadas pela comutação dos bancos de condensadores, através da implementação do circuito de carga dos condensadores e o controlo do momento da comutação por parte do microcontrolador, verificou-se que esta era a situação mais favorável, apresentando melhores resultados quando comparados com outros métodos implementados.

Como se pode observar pelos resultados experimentais no capítulo anterior, a compensação da potência reactiva foi bem sucedida uma vez que o desfasamento entre a tensão e corrente foi corrigido, no entanto devido as características inerentes da compensação do factor de potencia com condensadores é visível alguma deformação na forma de onda da corrente, devido ao facto dos condensadores amplificarem as harmónicas presentes na forma de onda da tensão da rede. Esta situação seria minimizada com a utilização deste sistema em níveis de potência mais elevada, onde não teria expressão dada a ordem das grandezas envolvidas.

Com a finalização deste trabalho também se pode concluir que foi uma mais-valia a nível do conhecimento e experiencias adquiridas nas diversas áreas, tais como a programação de microcontroladores e condicionamento de sinal.



6.1. Trabalhos Futuros

O sistema apresentado tem apenas três escalões de compensação, no entanto seria vantajoso aumentar o número de escalões para haver uma melhor resposta às variações da potência reactiva da carga.

Uma vez que o sistema proposto é um protótipo e devido às limitações de equipamentos de teste, seria interessante verificar o comportamento do sistema quando presente a tensões e correntes mais elevadas.

Propõe-se também que o sistema de compensação (circuitos de aquisição e condicionamento dos sinais) seja implementado numa placa de circuito impresso para se tornar mais simples a sua utilização, facilitando as ligações com outros elementos e evitando assim, grandes distâncias entre os componentes, tornando o sistema mais imune a perturbações externas.

Seria vantajoso desenvolver um sistema que permitisse analisar o factor de potência real, onde fosse contabilizado todo o conteúdo harmónico.



7. Bibliografia

1. **Dugan, Roger C., et al., et al.** *Electrical Power Systems Quality*. s.l. : McGraw-Hill, 2004.
2. **SANKARAN, C.** *Power Quality*. United States of America : CRC PRESS, 2002.
3. **Natarajan, Ramasamy.** *Power System Capacitors*. United States of America : CRC PRESS, 2005.
4. **Kennedy, Barry.** *Quality Primer*. s.l. : McGraw-Hill, 2000.
5. **Johns, Yong Hua Song and Allan T.** *Flexible Transmission Systems (FACTS)*. United Kingdom, London : The Institution of Engineering and Technology, 1999.
6. **Mathu, R. Mohan e Varma, Rajiv K.** *THYRISTOR-BASED FACTS CONTROLLERS FOR ELECTRICAL TRANSMISSION SYSTEMS*. United States of America : A JOHN WILEY & SONS, INC, 2002.
7. **Acha, E., et al., et al.** *Power Electronic Control in Electrical Systems*. U.K : Newnes, 2002.
8. **Soares, Vasco.** *APS – Aquisição e Processamento Digital de Sinais*. ISEL : ADEEEA, 2012.
9. **Grigsby, Leonard L.** *Power Systems*. s.l. : CRC Press, 2006.
10. **Sarma, R. Sastry Vedam & Mulukutla S.** *Power Quality VAR Compensation in Power Systems*. s.l. : CRC Press, 2009.
11. **T.Thompson, Alexander Kusko & Marc.** *Power Quality in Electrical Systems*. s.l. : Mc Graw Hill, 2007.
12. **MALIK, ABDELHAY A. SALLAM & O.P.** *Electric Distribution Systems*. s.l. : Wiley, 2011.
13. **Robert F. Coughlin, Frederick F. Driscoll.** *Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits* . s.l. : Prentice Hall, 2001.
14. **Zanco, Wagner da Silva.** *Microcontroladores PIC18 com linguagem C*. São Paulo : ERICA, 2010.
15. **Gonçalves, Victor.** *SISTEMAS BASEADOS EM MICROCONTROLADORES PIC*. s.l. : Publindústria, 2008.
16. **Huelsman, Lawrence P.** *Active and Passive Analog Filter Design*. s.l. : McGraw-Hill, 1993.

8. ANEXOS



8.1. Anexo 1– Esquema Eléctrico Geral

