



Distorção harmónica causada pelos LEDs em iluminação pública - análise e proposta de soluções

KHULOUD KALTHOUM

Novembro de 2016

Distorção harmónica causada pelos LEDs em iluminação pública - análise e proposta de solução

Khuloud Marwan Kalthoum

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em
Energias Sustentáveis

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica

18 de novembro de 2016

Relatório da Unidade Curricular de Dissertação/Projecto/Estágio do 2º ano do Mestrado
em Energias Sustentáveis

Candidata: Khuloud Marwan Kalthoum, N° 1141404, 1141404@isep.ipp.pt
Orientação Científica: Doutor Manuel Carlos Malheiro de Carvalho Felgueiras,
mcf@isep.ipp.pt

Empresa: EDP Distribuição – Energia, S.A. - Braga.
Supervisão: Eng.º Domingos Pereira Carvalho, domingos.pereiracarvalho@edp.pt

Mestrado em Engenharia Energias Sustentáveis
Departamento de Engenharia Mecânica



18 de novembro de 2016

Ao amor da minha vida.

Agradecimentos

Gostaria inicialmente de agradecer à Plataforma global para estudantes sírios nas pessoas do ex-Presidente Jorge Sampaio e Doutora Helena Barroco, sua assessora e nossa querida madrinha. Estou muito grata aos portugueses pela enorme oportunidade que me foi proporcionada de continuar os meus estudos. Muito obrigada.

Ao meu orientador Prof.º Manuel Carlos Felgueiras e à minha Diretora do mestrado Prof.ª Nídia Caetano pelo apoio e compreensão que sempre manifestou. O meu sincero e profundo reconhecimento por tudo.

Ao meu orientador na EDP-D, Eng.º Domingos Carvalho por toda a disponibilidade e orientação prestada. O meu agradecimento à família da EDP-D a todos engenheiros e trabalhadores que tanto me ajudaram e apoiaram, em especial ao técnico profissional de manutenção José Costa Carvalho.

Um agradecimento especial aos investigadores do Grupo de Eletrónica de Potência e Energia GEPE do Centro Algoritmi da Universidade do Minho, por me receberem muito bem aquando da visita ao laboratório e pelo tempo despendido posteriormente. Agradeço em especial Eng.º José Cunha, ao Prof.º José Gabriel Oliveira Pinto e ao Eng.º Bruno Exposto por sempre se mostrarem disponíveis para me aconselhar e apoiar.

A nível pessoal, gostaria de agradecer a todos os meus colegas e amigos que me acompanharam ao longo dos últimos dois anos e que me apoiaram sempre que foi possível.

Agradeço à minha família pelas palavras de conforto e de incentivo. Um especial agradecimento ao meu querido pai que, ao invés de me dizer para ser uma pessoa com os pés assentes na terra, me deu asas para voar e sonhar.

شكر و تقدير

بداية أود أن أشكر المنصة العالمية للطلاب السوريين بقيادة الرئيس السابق جورج سامبايو و السكرتير الخاص الدكتورة هيلينا باروكو. شكري الخالص لكل البرتغاليين على الفرصة الكبيرة التي قدموها لي من أجل تكملة مسيرتي العلمية و على المعاملة الحسنة.

أتقدم بالشكر للدكتور المشرف على الرسالة أ.د مانويل كارلوس فيلغابريش، و لرئيسة قسم الماجستير في قسم الطاقات المستدامة أ.ب نيديا كابتانو على كل الدعم و المتابعة المستمرة، فلهم مني جزيل الشكر.

أود أن أشكر المهندس المشرف على الرسالة أ.م دومينغوش كارفاليو على التوجيهات القيمة. أشكر كل المهندسين العاملين في شركة الكهرباء EDP على المساعدة و الدعم، و أخص بالذكر الفني الخبير في الصيانة أ. جوزيه كارفاليو على الخبرة و المساعدة الكبيرة التي قدمها.

شكر خاص للكادر العلمي في مخبر الكترولنيات الطاقة و القوى التابع لجامعة مينيو في غمرايش، جزيل الشكر على الاستضافة في المخبر و على الوقت الثمين الذي قدموه لمساعدتي، أخص بالذكر أ.م جوزيه كونيا ، أ.ب غابرييل بينتو ، إلى طالب الدكتوراه م. برونو اسبوستو على اسداء النصائح و الاستعداد التام للمساعدة.

كما أتقدم بالشكر لكل زملائي الطلبة على المساعدة و المشاركة خلال كامل السنتين الماضيتين.

امتناني لعائلتي على الدعم و التشجيع. أود أن أخص بالشكر والدي الغالي الذي رافقني في مسيرتي لإتمام هذا العمل و الذي دعمني للسفر و تكملة تحصيلي العلمي و تحقيق حلمي. مع خالص تقديري و حيي

Resumo

A eficiência energética e a gestão da solicitação da energia são factores fundamentais para a competitividade da indústria. O crescente interesse pela eficiência global do sistema eléctrico tem provocado um crescimento na utilização de equipamentos mais eficientes que, embora permitam reduzir as perdas, têm levado ao aumento da distorção harmónica. Estudos revelam que os custos directos relacionados com perda de Qualidade da Energia Eléctrica (QEE) podem representar cerca de 1,5 % do PIB nacional. Os monitorizadores de QEE vêm ao encontro desta situação detetando problemas tanto no consumo como no fornecimento/distribuição de energia. O relatório do Inquérito Europeu sobre a QEE mostrou que os problemas de qualidade de energia são responsáveis por metade do tempo de inatividade na maioria das instalações. Em termos financeiros esta situação representa uma perda financeira de mais de 150 mil milhões de euros por ano nos países da UE-25.

Dando um exemplo mais recente, as luminárias baseadas em LEDs são de facto muito eficientes mas são cargas não-lineares. Numa linha de iluminação pública é essencial haver monitorização para a detecção e é essencial correção dos problemas associados à QEE para não comprometer nem a qualidade do serviço nem a produtividade da EDP. Com efeito, os LEDs apresentam vantagens bem documentadas mas, por serem cargas não lineares, têm impacto negativo na QEE da rede de distribuição, principalmente na rede de baixa tensão onde é feita a ligação com a maior parte dos clientes. É também aí e onde se encontram a ligação às fontes de energia descentralizadas que incluem conversores de potência que produzem energia com forma de onda com um determinado grau de distorção. Estes dois factores contribuem para o aumento da distorção da forma de onda de tensão e tem como consequência o aumento das perdas.

Com o presente trabalho centramos esforços no desenvolvimento do sistema de iluminação pública. Pretende-se analisar o impacto provocado pela migração da iluminação pública tradicional para luminárias a LED e avaliar a possibilidade de integrar o banco de condensadores ou filtros. Estes poderiam ser instalados em subestações de distribuição, indústrias e prédios comerciais a fim de resolver os problemas relacionados com o conteúdo harmónico, com o desequilíbrio de cargas e com a compensação do factor de potência.

É feito um caso de estudo num sistema de Iluminação Pública (IP) na Avenida João Paulo II, em Braga. Os resultados mostram um nível elevado de distorção harmónica, no Ponto de Acoplamento Comum (PCC), no sistema de distribuição e que se torna ainda mais grave para níveis de carga elevados.

Palavras-Chave

Cargas não-lineares, poupança energética, compensação do factor de potência, qualidade de energia, THD, LED.

Abstract

Energy efficiency, effective management of energy demand and its conservation are key factors for the competitiveness of industry today. The growing interest on overall power system efficiency caused an increasing utilization of more efficient equipment that, in spite of reducing losses, increased the harmonic distortion. Studies reveal that the direct costs related to loss of power quality can represent approximately 1.5% of the national GDP. According with this situation, Power Quality Analyzers are used to detect problems related with energy sourcing and energy consumption. The European Power Quality survey report declared that Power Quality problems are responsible for half of equipment downtime in most installations. In other words, PQ problems cause a financial loss of more than 150 billion Euros per year in the EU-25 countries. For example, in the case of street lighting line with non-linear loads (LEDs lamps), it is crucial to have an equipment to monitor continuously the PQ of the grid. If the poor Power Quality causes a problem in the manufacturing process, the product quality can be compromised, along with productivity. Although non-linear loads bring well known advantages, they also have a negative effect on the grid's power quality, in particular, the low voltage grid where the connection with most non-linear loads and with the decentralized energy sources. It is due to the use of control equipment (power converters) which produce distorted energy and increase losses.

This research study makes an efforts on developing a street lighting system, on evaluating the harmonic distortion caused by LEDs. It is intended show the possibility to integrate active filters which can be used in distribution substations, commercial and industrial buildings, to solve problems related to harmonics, load unbalance and power factor compensation.

Simulations to obtain the voltage and current waveforms were carried out to a case study on a street lighting system in Braga at João Paulo II Avenue.

The results show high level of harmonic distortion, at the Point of Common Coupling (PCC), in the distribution system which becomes even more aggravated when a higher loading level, of the distribution transformer, is considered.

Keywords

Non-linear loads, Power savings, Power factor correction, power quality, Total Harmonic Distortion THD, Light Emitter Diode LED.

الملخص

كفاءة الطاقة و الإدارة الفعالة لزيادة الطلب على الطاقة الكهربائية هما عاملان أساسيان للمنافسة في السوق الصناعية اليوم. الإستخدام الفعال للطاقة هو استخدام كمية أقل من الطاقة لأداء نفس الوظيفة. وفي أعقاب الاهتمام المتزايد بالأنظمة الرشيدة للطاقة لتعزيز أسلوب حياة أكثر استدامة، أدى ذلك إلى استخدام التقنيات التي على الرغم من مردودها العالي و مساهمتها الملحوظة في تحسين جودة الخدمة. لكن من جهة أخرى هي سبب في نشوء التوافقيات في الشبكة الكهربائية. أظهرت الدراسات أن التكاليف المباشرة الناتجة عن مشاكل جودة الطاقة الكهربائية تمثل حوالي ٥,١٪ من الناتج الإجمالي المحلي. أجهزة مراقبة الشبكة أنشأت من أجل الكشف عن هذه المشاكل و تحليلها من جهة مصادر التغذية و من جهة التوزيع. أظهرت نتائج استقصاء أوروبي أن المشاكل المرتبطة بجودة الطاقة الكهربائية بما في ذلك التوافقيات، مسؤولة عن نصف الأعطال و نقصان العمر الافتراضي للمعدات في معظم المنشآت. من وجهة نظر اقتصادية، هذا يعني خسارة مالية كبيرة تصل حتى ١٥٠ ألف مليون يورو سنوياً في جميع دول الاتحاد الأوروبي.

كمثال عن هذه التقنيات الحديثة، تقنية الليد LED والتي لا شك أنها علامة بارزة في تاريخ تقنيات الإنارة، وتُعد أحدث التطورات التقنية وأهمها على الإطلاق في عالم أجهزة الإنارة. فهي تتميز بكفاءتها الفائقة في توفير الطاقة؛ ذلك لأنها قادرة على توفير الطاقة بنسبة تصل إلى أكثر من ٩٠٪ مقارنة بالمصابيح التقليدية. علاوةً على ذلك، فإن مصابيح الLED توفر كذلك على صعيد الصيانة والاستبدال بسبب طول عمرها الافتراضي، ما يجعلها البديل الأمثل من حيث توفير الطاقة والتكلفة. وقد بدأت تستخدم مؤخراً في الإنارة العامة للشوارع. على الرغم من هذه الميزات، إنها تعتبر أحمال غير خطية (أي أحمال ذات الخصائص غير الخطية)، حيث تقوم هذه الأحمال عموماً بتوليد التوافقيات في مصدر تغذيتها. مؤخراً بدأت تُستخدم هذه التقنية في نظم الإنارة العامة حيث من الضروري تحليل أداء الشبكة و إيجاد الحلول لتخفيف أثر التوافقيات في موجات التيار والتوتر المنخفض و تقليل الضياعات في شبكة التوزيع من أجل تحسين جودة الطاقة المقدمة لعدد كبير من المستهلكين. يتم ربط شبكة التوزيع أيضاً مع مصادر الطاقة المتجددة عبر المقومات و المبدلات التي هي من المصادر الرئيسية للتوافقيات.

يهدف هذا العمل إلى تركيز الجهود لتطوير نظام الإنارة العامة الحالية. كما يهدف إلى تحليل الأثر الناجم عن استبدال تقنيات الإنارة التقليدية بتقنية الليد، تحليل أداء الشبكة بوجود التوافقيات، تقييم إمكانية ربط مكثفات التعويض مع شبكة التوزيع، حل آخر مقترح هو ربط مرشحات على التسلسل أو على التفرع مع الحمل، لتحسين معامل الاستطاعة و تعويض الفاقد.

تم انجاز العمل في شارع Avenida João Paulo II في مدينة براغا، و أظهرت النتائج وجود التشوه التوافقي في موجات التيار المستخرج من الدارات الإلكترونية المُتحكمة بأجهزة الإنارة LED و التي تؤدي بدورها إلى تشوه في شكل موجات الجهود.

تكمن أهمية البحث في أنه يساهم في تحسين جودة الطاقة الكهربائية و تقليل ضياعات المحولة و الخطوط، مع الحفاظ على الاعتبارات البصرية عند إنارة الشوارع، و أهمها الإضاءة التي تؤمن الاستقرار البصري للعين البشرية، كما يجب الحفاظ على الاعتبارات البيئية.

الكلمات المفتاحية:

الأحمال غير الخطية، تحسين معامل الاستطاعة، الطاقة المُوفّرة، جودة الطاقة، التشوه التوافقي الكلي، LED.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
شكر و تقدير	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
الملخص	IX
ÍNDICE	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE TABELAS	XVII
SIGLAS E ACRÓNIMOS	XIX
1. INTRODUÇÃO	27
1.1. A EMPRESA EDP DISTRIBUIÇÃO	27
1.2. DIREÇÃO DE REDE E CLIENTES NORTE - EDP DISTRIBUIÇÃO	29
1.3. IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA	31
1.4. CONTEXTUALIZAÇÃO - CONSUMO DE ENERGIA	33
1.5. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	37
2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS	39
2.1. GRANDEZAS E CONCEITOS LUMINOTÉCNICOS	39
2.2. CARACTERÍSTICAS DAS LÂMPADAS	43
2.3. TIPOS DE LÂMPADAS	45
2.4. CONCEITOS BÁSICOS ASSOCIADOS À UTILIZAÇÃO DO LED	55
2.5. LED DRIVER	60
2.6. MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO – PWM	61
2.7. AS HARMÓNICAS NA REDE ELÉCTRICA	63
2.8. O INTERESSE DA COMPENSAÇÃO DO FP	77
2.9. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE AS POSSIBILIDADES DE CORREÇÃO DO FP	80
2.10. CARGAS NÃO-LINEARES	80
2.11. MEDIÇÃO DE POTÊNCIAS	83
▪ A SÉRIE DE FOURIER	83
▪ TEORIA P-Q	86
3. ESTADO DA ARTE	89
3.1. BREVE HISTÓRIA DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA EM PORTUGAL	89
3.2. TECNOLOGIAS DAS LÂMPADAS APLICÁVEIS EM SISTEMAS DE IP	94

TECNOLOGIA LED - ALGUNS EXEMPLOS EXISTENTES NO MERCADO HOJE	98
3.3. LUMINÁRIAS	101
3.4. EQUIPAMENTOS ACESSÓRIOS - DRIVERS	106
3.5. ANALISADORES DE ENERGIA ELÉTRICA	108
3.6. SISTEMAS ATUAIS DE CONTROLO E GESTÃO DE ENERGIA NA IP	113
4. QUALIDADE DE ENERGIA ELÉCTRICA	119
4.1. CONCEITOS ASSOCIADOS À QUALIDADE DE ENERGIA.....	119
4.2. AS PERTURBAÇÕES DA QEE.....	121
4.3. NORMAS ASSOCIADAS À QUALIDADE DE ENERGIA ELÉCTRICA	132
5. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA IP - POLÍTICAS E ESTRATÉGIAS.....	145
5.1. CLASSIFICAÇÃO DAS VIAS E NÍVEIS MÍNIMOS DE REFERÊNCIA	146
5.2. LIMITES FOTOMÉTRICOS PARA LÂMPADAS	148
5.3. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA INSTALAÇÃO.....	151
5.4. POUPANÇAS ALCANÇADAS ATÉ À DATA COM O PNAEE.....	152
5.5. ESTRATÉGIAS PARA FUTURO	153
6. CENÁRIO DE ESTUDO - RESULTADOS.....	155
6.1. INSTALAÇÃO EM ESTUDO	155
6.2. CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL.....	158
6.3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	160
6.4. CÁLCULO DAS PERDAS DE TRANSFORMADOR.....	163
7. PROPOSTA DE SOLUÇÃO, IMPLEMENTAÇÃO, VALIDAÇÃO.....	167
7.1. PROPOSTA DE SOLUÇÃO	168
7.2. IMPLEMENTAÇÃO DE SOLUÇÃO	172
7.3. VALIDAÇÃO DE SOLUÇÃO.....	174
8. CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E PROPOSTAS DE TRABALHO FUTURO	179
8.1. CONCLUSÕES.....	179
8.2. LIMITAÇÕES E PROPOSTA DE TRABALHO FUTURO.....	183
RECONHECIMENTO.....	185
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	187
ANEXOS.....	191

Índice de Figuras

Figura 1	- História da Marca EDP [EDP, 2016].	28
Figura 2	- Rede e de DRCs da EDP [EDP, 2015].	30
Figura 3	- O mapa das Áreas Operacionais da DRCN [EDP, 2015].	30
Figura 4	- A responsabilidade da fraca Qualidade de Energia [LPQI, 2009].	32
Figura 5	- Histórico do consumo total de energia elétrica em Portugal vs. iluminação de vias públicas.	34
Figura 6	- Percentagem do consumo total de energia elétrica utilizado em iluminação de vias públicas.	35
Figura 7	- Estrutura do consumo da energia por nível de tensão [EDP, 2015].	35
Figura 8	- Evolução da tarifa de IP em Portugal [INE, 2013].	36
Figura 9	- Distribuição dos custos durante a vida útil do sistema de iluminação [EDP, 2009].	36
Figura 10	- O factor de manutenção de instalação [EDP, 2010].	40
Figura 11	- O factor de manutenção da luminosidade da lâmpada [EDP, 2010].	41
Figura 12	- O factor de sobrevivência da lâmpada [EDP, 2010].	41
Figura 13	- O factor de manutenção da luminária [EDP, 2010].	42
Figura 14	- Exemplo de uma luminária globo ineficiente e eficiente.	42
Figura 15	- Tempo de vida médio e útil de uma lâmpada.	45
Figura 16	- Diagrama com os tipos de lâmpadas existentes [9].	46
Figura 17	- Constituição de uma lâmpada incandescente [10].	46
Figura 18	- Ilustração de lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão [10].	47
Figura 19	- Lâmpada fluorescente [10].	48
Figura 20	- Lâmpada de vapor de Sódio de alta pressão [10].	49
Figura 21	- Eficácia das lâmpadas de VSAP [EDP, 2009].	50
Figura 22	- Detalhes construtivos de uma lâmpada de iodetos metálicos.	51
Figura 23	- Lâmpada de indução.	51
Figura 24	- Estrutura de um LED (esquerda), Interior do LED (direita).	52
Figura 25	- Representação interna do princípio de funcionamento de um LED.	53
Figura 26	- Curva Característica I-V do LED [CREE].	53
Figura 27	- Lâmpada de plasma [EDP].	54
Figura 28	- Exemplo de circuito LED.	59
Figura 29	- Folha de especificação de LED [Everlight].	59
Figura 30	- Eficácia luminosa vs. Corrente forward de LED [32].	60
Figura 31	- Sistema de iluminação baseado em LEDs [Philips].	60
Figura 32	- Funcionamento do PWM [58].	61

Figura 33	- A comparação entre a corrente contínua e corrente pulsada ao mesmo fluxo luminoso Φ_R [57].	62
Figura 34	- Perdas de comutação.	63
Figura 35	- Onda fundamental e 5º harmónico [16].	64
Figura 36	- Soma da fundamental com o 5º harmónico [16].	64
Figura 37	- Tensão e corrente nas cargas lineares.	65
Figura 38	- Tensão e corrente nas cargas não-lineares.	66
Figura 39	- Circuito do rectificador diode-capcitor.	66
Figura 40	- Circuito eléctrico equivalente.	67
Figura 41	- Efeito das harmónicas na linha eléctrica [59].	67
Figura 42	- Uma onda de corrente e respectivo espectro harmónico [18].	72
Figura 43	- A distorção harmónica causada pelo diode.	72
Figura 44	- O triângulo das três principais potências.	74
Figura 45	- Ângulo de desfasagem entre corrente e tensão [SIEMENS, 2005].	75
Figura 46	- Variação do FP em função da THDi [SIEMENS, 2005].	76
Figura 47	- Variação das perdas de energia em condutores em função do FP [CODI, 2004].	78
Figura 48	- Correção do FP por capacitores [EPCOS].	80
Figura 49	- Características de uma carga linear.	81
Figura 50	- Características de uma carga não linear.	81
Figura 51	- Corrente de uma lâmpada fluorescente com balastro electromagnético e com balastro electrónico respetivamente [24].	82
Figura 52	- Corrente e tensão emitidas por uma lâmpada LED de 7 W [25].	83
Figura 53	- A Séries de Fourier usanda círculos.	85
Figura 54	- A transformada de Fourier do domínio do tempo e da frequência [27].	85
Figura 55	- FFT usando Matlab.	86
Figura 56	- Componentes de potência sugeridos pela Teoria p-q, juntamente com um filtro activo paralelo.	87
Figura 57	- Possível relação entre potências - activa, reactiva e distorção.	87
Figura 58	- Lâmpadas de óleo na Mesopotâmia [Museu da Lâmpada].	90
Figura 59	- Lucernas de cerâmica [Museu da Lâmpada, 2014].	90
Figura 60	- Lâmpada de Argand.	91
Figura 61	- Lâmpada de gás.	91
Figura 62	- Lâmpada eléctrica incandescente [Museu da Lâmpada].	92
Figura 63	- A Evolução da paisagem tecnológica da Iluminação Pública lisboeta [Município de Lisboa].	92
Figura 64	- Lâmpadas de descarga de alta intensidade.	93
Figura 65	- Linha de tempo de lâmpadas no segmento da iluminação pública.	94
Figura 66	- Uma classificação das tecnologias das lâmpadas na IP.	95
Figura 67	- Descida dos custos para tecnologias de energia limpa [DOE, 2015].	96

Figura 68	- História passada e expansão projetada das aplicações de LED com base nos previstos aumentos de eficiência luminosa [34].	96
Figura 69	- Histórico e projeção da evolução da eficiência do LED.	97
Figura 70	- A evolução de LEDs [CREE].	97
Figura 71	- Matriz dos vários tipos de tecnologias da IP.	98
Figura 72	- Exemplo de uma Luminária LEDs existente marca Schröder modelo TECEO1.	98
Figura 73	- Exemplo de uma Luminária LEDs marca Labina.	99
Figura 74	- Luminária LEDs marca Schröder modelo Voltana5.	100
Figura 75	- Luminária inadequada para utilização em IP.	102
Figura 76	- Da esquerda para a direita está exemplificado o aumento na eficiência luminosa das luminárias. Conjunto óptico eficiente [Indal, 2011].	102
Figura 77	- Exemplos de luminárias LED e luminária com lâmpada VSAP.	103
Figura 78	- Exemplo de uma armadura de uma luminária LED actual [Schröder].	104
Figura 79	- Armaduras equipadas com lâmpadas de Indução.	105
Figura 80	- Luminária com difusor em vidro auto-limpável.	105
Figura 81	- Luminária alimentada por energia solar.	106
Figura 82	- Analisador de energia Fluke 1760.	109
Figura 83	- Analisador de energia Fluke 434.	111
Figura 84	- G4430 BLACKBOX [39].	112
Figura 85	- Metodologias atuais de controlo de energia na IP [EDP, 2015].	114
Figura 86	- Sensor crepuscular	114
Figura 87	- Relógio Astronómico	115
Figura 88	- Balastro electrónico de duplo nível [EcoLum].	115
Figura 89	- Esquematização de um sistema de telegestão de uma rede de IP.	117
Figura 90	- Fonte de alimentação comutada.	120
Figura 91	- Forma de onda da tensão e corrente de um sistema com carga não linear.	121
Figura 92	- Forma de onda da tensão e corrente de um sistema com carga linear.	121
Figura 93	- Zonas de degradação da QEE no sistema eléctrico de energia.	122
Figura 94	- Transitório impulsional.	123
Figura 95	- Transitório oscilatório.	123
Figura 96	- Interrupção de curta duração.	124
Figura 97	- Cava de tensão.	125
Figura 98	- Sobretensão de curta duração.	126
Figura 99	- Flutuação de tensão.	127
Figura 100	- Variação da tensão provocada por flicker dos tipos A, B,C,D	128
Figura 101	- Um exemplo de desequilíbrio de tensões num sistema trifásico [LeonardoEnergy, 2013].	129
Figura 102	- Ilustração das tensões da Figura 108 como vectores [LeonardoEnergy, 2013].	129
Figura 103	- Distorção harmónica numa onda de tensão [EDP, 2005].	131

Figura 104 - Parâmetros utilizados na concretização de uma normalização [ISEP, 2013].....	133
Figura 105 - Entidades reguladoras internacionais e portuguesas associadas à normalização da QEE [ISEP, 2013].	134
Figura 106 - Normalização da QEE, internacionais e portuguesas [ISEP, 2013].....	134
Figura 107 - ilustração do mecanismo de controlo de consumo energia elétrico.	146
Figura 108 - Cronograma de estratégias nacionais para a eficiência energética.....	146
Figura 109 - Impacto das medidas de QEE no consumo de energia em Portugal [PNAEE 2015]. 152	
Figura 110 - Impacto previsto das medidas de eficiência energética do PNAEE a 2016 [DGEG]. 153	
Figura 111 - Barramento do QGBT	156
Figura 112 - Carta da rede MT da linha Lamações – Sotto maior	157
Figura 113 - Traçado da Avenida João Paulo II, em Braga do ponto A ao B, [Fonte:GeoAct] ..	158
Figura 114 – tipo das lâmpadas utilizada a vista do ponto A(esq), do ponto B(dir).....	159
Figura 115 - O aparelho fluke 1760 no terreno.....	159
Figura 116 - Espectro harmónico da tensão no PCC numa situação em vazio.	160
Figura 117 - Espectro harmónico da corrente no PCC numa situação de vazio.	161
Figura 118 - O oscillograma da tensão e da corrente do fase S no PCC em malha fechada.	161
Figura 119 - Espectro harmónico da tensão no PCC em malha fechada.	162
Figura 120 - Espectro da corrente no PCC em malha fechada	162
Figura 121 - Perdas de carga adicionadas do transformador 630kVA.	166
Figura 122 - Filtro passivo.....	170
Figura 123 - Filtro Activo.....	171
Figura 124 - Filtro híbrido.	171
Figura 125 - Esquema do banco de condensadores.	172
Figura 126 - Esquema de um filtro passivo LC, LCL respectivamente.....	172
Figura 127 - Esquema de um filtro activo paralelo para um sistema trifásico [GEPE].	173
Figura 128 - Diagrama em blocos da implementação.....	174
Figura 129 - Diagrama de bloco do circuito LEDs.	174
Figura 130 - Programação do driver	175
Figura 131 - Poupanças potenciais.	176

Índice de Tabelas

Tabela 1	- Caracterizações e consumo de energia da DRCN [EDP, 2015].	31
Tabela 2	- Temperaturas de cor.	44
Tabela 3	- A classificação do índice de restituição de cores.	44
Tabela 4	- Elevação da tensão de arco [4].	49
Tabela 5	- Comparação entre os vários tipos de tecnologias.	58
Tabela 6	- As diferenças entre <i>drivers</i> de corrente contínua e de corrente pulsada.	62
Tabela 7	- Os valores do Factor de Crista obtidas pela Figura 41.	73
Tabela 8	- Impacto de inconvenientes da energia reativa à rede elétrica.	79
Tabela 9	- Comparação das várias topologias para andar Powe Factor Correction [14].	107
Tabela 10	- As características técnicas de um driver de lâmpada LEDs atual LG Innotek.	107
Tabela 11	- Características do analisador de energia Fluke 1760.	110
Tabela 12	- Características do analisador de QEE Fluke 434.	111
Tabela 13	- Medidas de implementação no sector de IP.	117
Tabela 14	- Principais problemas de Qualidade de Energia Eletrica [1][47].	122
Tabela 15	- Classificação das harmónicas [EDP, 2005].	131
Tabela 16	- Classificação das zonas de implementação dos padrões de qualidade de serviço, de acordo com o RQS [ERSE, 2009].	136
Tabela 17	- Valores dos primeiros 25 harmónicas de tensão nos pontos de fornecimento, expressos em percentagem da tensão nominal UN. [Fonte:NP/EN50160]	137
Tabela 18	- Níveis de compatibilidade para as harmónicas de tensão em redes públicas de BT.	139
Tabela 19	- Níveis de compatibilidade para harmónicas.	140
Tabela 20	- Limites para distorção harmónica da corrente.	141
Tabela 21	- Limites máximos de distorção.	143
Tabela 22	- Os limites de % IHDi do sistema de distribuição (120V a 69000V)	144
Tabela 23	- Limites fotométricos para vias de tráfego motorizado e de pedestres [Fonte:ANSR]	147
Tabela 24	- Os valores do FMLL de diferentes fontes de luz.	148
Tabela 25	- Os valores do FSL de diferentes fontes de luz.	149
Tabela 26	- Os valores de FML de diferentes tipo das luminárias.	149
Tabela 27	- Características técnicas do transformador de potência em estudo.	163
Tabela 28	- Resultados - Impacto do factor de potência e factor K ao transformador.	164
Tabela 29	- Escalões para facturação da energia reactiva indutiva.[EDP-D 2011].	168
Tabela 30	- Resultados após da correção do factor de potência.	169
Tabela 31	- Horário do relógio astronómico.	175

Tabela 32	- Consumo de custo da energia consumida antes da correção.....	175
Tabela 33	- Consumo de custo da energia consumida após da correção.....	176
Tabela 34	- Custo da energia consumida total das todas luminárias LED em Portugal.....	177

Siglas e acrónimos

R	<i>Resistência</i>	V	<i>Volt</i>	n	<i>Nano (10^{-9})</i>
L	<i>Indutância</i>	A	<i>Ampere</i>	μ	<i>Micro (10^{-6})</i>
C	<i>Capacidade</i>	W	<i>Watt</i>	m	<i>Mili (10^{-3})</i>
V	<i>Tensão</i>	Ω	<i>Ohm</i>	k	<i>Kilo (10^3)</i>
V _{CC}	<i>Tensão do lado CC</i>	F	<i>Farad</i>	M	<i>Mega (10^6)</i>
V _{pico}	<i>Tensão de pico</i>	Hz	<i>Hertz</i>	G	<i>Giga (10^9)</i>
I	<i>Corrente</i>	h	<i>hora</i>	T	<i>Tera (10^{12})</i>
I _{pico}	<i>Corrente de pico</i>	s	<i>Segundo</i>		
P	<i>Power</i>	K	<i>Kelvin</i>		
η	<i>Rendimento</i>	$^{\circ}\text{C}$	<i>Celsius</i>		
φ	<i>Ângulo</i>	dB	<i>Decibéis</i>		
Φ	<i>Fluxo</i>	lm	<i>lúmen</i>		
f	<i>Frequência</i>	H	<i>Henry</i>		
ω_0	<i>Frequência de corte</i>	o	<i>Graus</i>		
T	<i>Temperatura</i>				
θ_A	<i>Temperatura ambiente</i>				
θ_{HS}	<i>Temperatura HotSpot</i>				
θ_g	<i>Hotspot rise over top oil temperture under non-linear load current</i>				
θ_{g-R}	<i>Hotspot temperature rise over top oil rise under rated condition</i>				
θ_{TO}	<i>Top oil rise over ambient temperture under non-linear load current</i>				
θ_{TO-R}	<i>Top oil rise under rated current</i>				

AIEE	–	<i>American Institute of Electrical Engineers</i>
AC	–	<i>Alternative Current</i>
AO	–	<i>Área Operacional</i>
AT	–	<i>Alta tensão</i>
BJT	–	<i>Bipolar Junction Transistor</i>
BT	–	<i>Baixa Tensão</i>
BTN	–	<i>Baixa Tensão Normal</i>
CA	–	<i>Corrente Alternativa</i>
CB	–	<i>Cabine Baixa</i>
CC	–	<i>Corrente Contínua</i>
CFLs	–	<i>Compact Fluorescent Lamps</i>
CI	–	<i>Circuito Integrado</i>
CPI	–	<i>Centro Português de Iluminação</i>
CSI	–	<i>Current Source Inverter</i>
DC	–	<i>Direct Current</i>
DEM	–	<i>Departamento de Engenharia Mecânica</i>
DGEG	–	<i>Direcção Geral de Energia e Geologia</i>
DRCN	–	<i>Direção de Rede e Clientes Norte</i>
HVDC	–	<i>High Voltage Direct Current</i>
EDP	–	<i>Energias de Portugal</i>
EDP-D	–	<i>EDP Distribuição</i>
EMI	–	<i>ElectroMagnetic Interference</i>

ENE	–	<i>Estratégia Nacional para a Energia</i>
ENF	–	<i>Energia Não Fornecida</i>
EP	–	<i>Electrónica de Potência</i>
ERSE	–	<i>Entidade Reguladora de Serviços Energéticos</i>
FC	–	<i>Factor de Crista</i>
FER	–	<i>Fontes de Energia Renovável</i>
FFT	–	<i>Fast Fourier Transform</i>
FM	–	<i>Factor de Manutenção</i>
FML	–	<i>Factor de Manutenção da Luminária</i>
FMLL	–	<i>Factor de Manutenção da Luminosidade da Lâmpada</i>
FP	–	<i>Factor de Potência</i>
FSL	–	<i>Factor de Sobrevivência da Lâmpada</i>
HID	–	<i>High Intensity Discharge</i>
HPM	–	<i>High Pressure Mercury</i>
HPS	–	<i>High Pressure Sodium</i>
IEEE	–	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IHD	–	<i>Individual Harmonic Distortion</i>
INE	–	<i>Instituto Nacional de Estatística</i>
IP	–	<i>Iluminação Pública</i>
IRC	–	<i>Índice de Reprodução de Cor</i>
ISEP	–	<i>Instituto Superior de Engenharia do Porto</i>
IV	–	<i>InfraVermelho</i>

LED	–	<i>Light Emitting Diode</i>
LEP	–	<i>Light Emitting Plasma</i>
LPQI	–	<i>Leonardo-energy Power Quality Inquiry</i>
LOR	–	<i>Light Output Ratio</i>
MAT	–	<i>Muito Alta Tensão</i>
MOSFET	–	<i>Metal–Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor</i>
MT	–	<i>Média Tensão</i>
NEEAP	–	<i>National Energy Efficiency Action Plan</i>
ONG	–	<i>Organização Não-Governamental</i>
ORD	–	<i>Operador de Rede de Distribuição</i>
PAC	–	<i>Ponto de Acoplamento Comum</i>
PCC	–	<i>Point of Common Coupling (similar to PAC)</i>
PNAC	–	<i>Programa Nacional para as Alterações Climáticas</i>
PNAEE	–	<i>Plano Nacional Acção Eficiência Energética</i>
PNAER	–	<i>Plano Nacional de Acção para as Energias Renováveis</i>
PFC	–	<i>Power Factor Correction</i>
PTD	–	<i>Posto de Transformação de Distribuição</i>
PTS	–	<i>Posto de Transformação e Seccionamento</i>
PVC	–	<i>Policloreto de Vinil</i>
PPEC	–	<i>Plano de Promoção da Eficiência no Consumo de energia eléctrica</i>
PT	–	<i>Posto de Transformação</i>
PWM	–	<i>Pulse With Modulation</i>

QGBT	–	<i>Quadro Geral de Baixa Tensão</i>
QEE	–	<i>Qualidade da Energia Elétrica</i>
RGB	–	<i>Red Green Blue</i>
RND	–	<i>Rede Nacional de Distribuição</i>
RMS	–	<i>Root Mean Square</i>
SE	–	<i>SubEstação</i>
SSL	–	<i>Solid State Light</i>
TDD	–	<i>Total Demand Distortion</i>
THD	–	<i>Total Harmonic Distortion</i>
THD _v	–	<i>Total Harmonic Distortion of voltage</i>
THD _i	–	<i>Total Harmonic Distortion of intensity</i>
TP	–	<i>Transformador de Potência</i>
VSAP	–	<i>Vapor de Sódio de Alta Pressão</i>
VSBP	–	<i>Vapor de Sódio de Baixa Pressão</i>
VSI	–	<i>Voltage Source Inverter</i>
UE	–	<i>União Europeia</i>
UV	–	<i>UltraVioleta</i>

Notação e Glossário

- Produto Interno Bruto (PIB) – *é um dos indicadores mais utilizados na macroeconomia e tem como principal objetivo medir a atividade económica de uma determinada região. Não pode ser considerado um índice de desenvolvimento, uma vez que não mede indicadores sociais, ambientais ou de bem-estar.*
- Postos de Transformação (PT) – *as instalação de alta tensão cuja função é a transformação da corrente eléctrica por um ou mais transformadores, sendo a corrente secundária utilizada directamente pelos receptores;*
- Ponto de Acoplamento Comum (PAC) – *ponto no sistema eléctrico compartilhado entre uma carga específica e outras cargas consumidoras;*
- Distorção harmónica – *forma de caracterizar a deformação de uma forma de onda sinusoidal.*
- Filtragem – *um termo genérico utilizado para, por exemplo, descrever os tipos de equipamento cuja finalidade é reduzir a taxa de distorção harmónica de tensão de corrente ou de fluxo em ou ser impressa em partes específicas de um sistema de energia eléctrica, ou ambos.*
- Carga não-linear – *uma carga que desenha uma onda de corrente não senoidal quando alimentado por uma fonte de tensão senoidal.*
- Factor de potência total – *a razão entre a potência ativa e a potência aparente*
- Factor de deslocamento – *é definido como o coseno do ângulo de defasamento entre tensão e corrente.*

Factor de distorção	– <i>resulta do não alinhamento da tensão e corrente devido a distorção das formas de onda.</i>
Total Demand Distortion (TDD)	– <i>é definida como a distorção harmónica da corrente, em % da máxima demanda da corrente de carga demanda de 15 ou 30 minutos. Isto significa que a medição da TDD deve ser feita no pico de consumo.</i>
Duty cycle (ciclo de trabalho)	– <i>coeficiente representa a relação entre o tempo em que o sinal de comando está com o valor necessário para o seu comando e entre o respectivo período total do sinal em questão.</i>
Período	– <i>é a grandeza que caracteriza a repetição no tempo.</i>
Frequência	– <i>parâmetro de uma que e que se define como sendo inversa do respectivo período. Em sistemas de energia está frequentemente associada ao valor da tensão utilizada e que nos EUA assume o valor nominal de 60Hz e na UE de 50 Hz.</i>
Valor eficaz (RMS)	– <i>valor de tensão ou corrente de um sinal AC calculado através de três operações matemáticas: (i) Determinação do quadrado da forma de onda; (ii) Cálculo da média da função resultante do primeiro passo ao longo do tempo; (iii) Determinação da raiz quadrada da função resultante. Corresponde ao valor de uma tensão contínua que, num mesmo tempo, faria dissipar igual valor de calor numa resistência.</i>
Dimmers	– <i>são dispositivos utilizados para variar a intensidade de uma corrente elétrica média numa carga</i>

1. Introdução

O presente documento insere-se na Dissertação/Projeto/Estágio que faz parte do 2º ano do Curso de mestrado em Energias Sustentáveis do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) e corresponde ao relatório final realizado no decorrer da sua realização. O trabalho foi feito durante um estágio curricular na empresa Energias de Portugal Distribuição (EDP-D) pelo com validação no terreno. Este projeto tem como objetivo fazer o levantamento de uma parte da iluminação pública de uma rua real, analisar o seu consumo e tipo de tecnologias utilizadas, para posteriormente implementar um conjunto de medidas que otimizem a sua eficiência. Para efeitos da simulação, foi usando analisador de rede FLUKE1760. A proposta foi também avaliada pela Direcção do DEM | ISEP e devidamente protocolada entre a EDP-D e o ISEP e tenta avaliar a distorção harmónica, causada por iluminação LED nos sistemas de distribuição, tendo em vista o aumento da eficiência do sistema para por redução das perdas na linha e no transformador e a melhoria do factor de potência. Um objetivo secundário seria um estudo de viabilidade económica da proposta.

Neste capítulo pretende-se apresentar a empresa onde foi realizado o estágio, a contextualização do trabalho realizado. Pretende-se assim, perceber melhor quais as motivações e os objectivos principais da da dissertação pretendidos para a sua concretização.

1.1. A empresa EDP Distribuição

A Energias de Portugal EDP (antiga denominação Electricidade de Portugal) é uma empresa do sector energético, verticalmente integrada, com uma posição consolidada na Península Ibérica, quer ao nível de produção, distribuição e comercialização de electricidade, como de gás.

Hoje o grupo EDP tem uma presença forte no panorama energético mundial, estando presente em países como Portugal, Espanha, França, Estados Unidos, Reino Unido, Itália, Bélgica, Polónia, Roménia e Brasil, contando com mais de 10 milhões de clientes e mais de 12 mil colaboradores em todo o mundo. A EDP está presente entre as 550 marcas globais com mais valor financeiro. De acordo com o estudo da consultora "Brand Finance" divulgado, em junho de 2016, a empresa vale cerca de 2.15 mil milhões de euros. A EDP está cotada no índice PSI-20¹.

Em suma, a marca da EDP passou, conforme se mostra na Figura 1, por diversas fases em sua história:

- 1978: a primeira marca EDP
- 1993: mudança e dinamismo
- 2004: energias de portugal
- 2006: sinta a nossa energia
- 2009: viva a nossa energia
- 2011: uma marca humana, inovadora e sustentável
- 2016: 40 Anos



Figura 1 - História da Marca EDP [EDP, 2016].

Vale a pena dizer que, 2016 é um ano especial para Grupo EDP, pois a história da EDP conta-se há 40 anos. A EDP foi criada em 1976, após a fusão de 13 empresas que tinham sido nacionalizadas no ano anterior. Três décadas depois, a empresa cresceu, conquistou mercados, alargou a atividade, expandiu negócios, mudou culturas. Inevitavelmente, a marca acompanhou todas estas mudanças e dela fazem parte milhões de famílias.

¹ PSI-20 (acrônimo de *Portuguese Stock Index*) é o principal índice da Euronext Lisboa. É o principal índice de referência do mercado de capitais português.

² Decreto-Lei n.º 344-B/82 - Portaria n.º 454/2001, de 5 de Maio - Portaria n.º 437/2001, de 28 de Abril.

³ O rácio de saída do fluxo luminoso (LOR) pode ser entendido como: $LOR = \frac{\phi \text{ saída da luminária}}{\sum \phi \text{ fonte de luz individual}}$

A EDP Distribuição é a empresa do Grupo EDP que opera em Portugal na actividade de distribuição de electricidade. A atividade da EDP-D é regulada pela Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE), que define as tarifas, parâmetros e preços para a energia eléctrica e outros serviços em Portugal e controla o cumprimento dos níveis de qualidade de serviço exigidos pela Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG). A EDP-D é concessionária da Rede Nacional de Distribuição (RND), rede de distribuição de energia eléctrica em média e alta tensão no território do Continente, sendo também concessionária da quase totalidade da rede de distribuição de Baixa Tensão, através de contratos de concessão celebrados com todos os municípios do Continente².

A EDP-D é responsável por assegurar o bom funcionamento, a segurança da rede de distribuição e por garantir a contagem de consumo iluminação pública (IP) e respetiva faturação, reunindo assim as competências necessárias para apoiar os municípios na sua transição para as novas soluções tecnológicas de eficiência energética. A empresa então fornece energia a mais de 6 milhões de clientes, através de uma rede com mais de 220 mil km.

1.2. Direção de Rede e Clientes Norte - EDP Distribuição

A Direção de Rede e Clientes Norte (DRCN) é, conforme se apresenta na Figura 2, uma das seis direções de rede e clientes da EDP Distribuição – Energia S.A., que asseguram a cobertura do território de Portugal Continental, no exercício da atividade regulada, pela Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE), de operador da rede de distribuição (RND e rede de BT).

² Decreto-Lei n.º 344-B/82 - Portaria n.º 454/2001, de 5 de Maio - Portaria n.º 437/2001, de 28 de Abril.

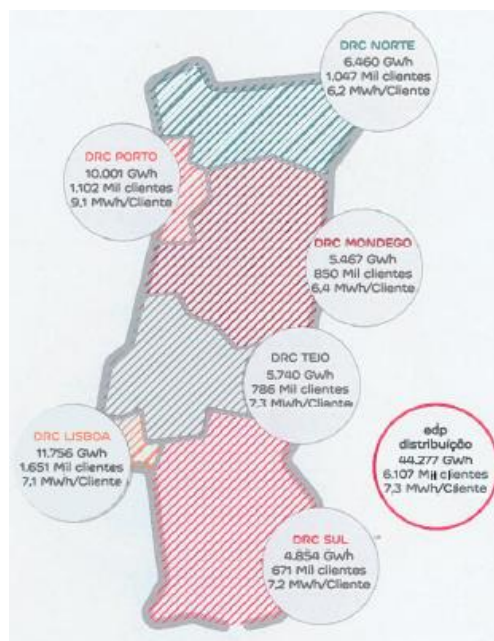


Figura 2 - Rede e de DRCs da EDP [EDP, 2015].

A DRCN, apresentada na Figura 3, está dividida em quatro Áreas Operacionais (AO), englobando no total 59 concelhos e 1.047 mil clientes.



Figura 3 - O mapa das Áreas Operacionais da DRCN [EDP, 2015].

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado na DRCN. A Figura representa o mapa desta direção e pode-se verificar que as suas áreas operacionais abrangem regiões de Braga, Viana do Castelo, Guimarães, Penafiel, Bragança e Vila Real.

Na Tabela 1 pode-se ver as caracterizações da DRCN, sendo de referir ainda que a IP é responsável por 4.1% de consumo total de energia.

Tabela 1 - Caracterizações e consumo de energia da DRCN [EDP, 2015].

Característica	Unidade	
Consumidores	1.047.348	
Área (km ²)	17.275	
Rede média e baixa tensão (km)	46.631	
Energia Distribuída (GWh)	6.460	
Pontos de luz	673.978	
Consumo de energia (GWh)	Total	6.460
	IP	267

As principais atividades da DRCN englobam as seguintes atividades: execução de obras para municípios no âmbito do contrato de concessão; manutenção da iluminação pública; migração de clientes de média tensão e baixa tensão (ramais e contagens); ligação de microprodutores e produtores em regime especial; assistência às redes de baixa tensão, média tensão, alta tensão e a clientes; manutenção de redes de baixa tensão e postes de transformação; projetos e obras de construção, de remodelação e de ampliação de redes de média tensão, baixa tensão, iluminação pública e postes de transformação [EDP,2015].

1.3. Identificação do problema

Nas últimas décadas o interesse pela Qualidade de Energia Elétrica tem aumentado substancialmente, tendo isto sido motivado, em grande parte, pela evolução da tecnologia. Apesar de se desenvolverem equipamentos cada vez mais eficientes, estes geram cada vez maior distorção harmónicas que podem provocar problemas em equipamentos mais sensíveis [1].

Num ambiente competitivo entre empresas onde a produtividade é uma condição para o sucesso, a aposta na utilização de equipamentos que permitem automatizar processos de produção é essencial. Optando-se pela automatização de processos de produção é possível fabricar um elevado número de produtos num tempo relativamente reduzido, e com um grau elevado de fiabilidade. Estando esses equipamentos dependentes da Qualidade da Energia Elétrica consumida, os problemas associados à mesma podem causar um mau funcionamento dos equipamentos, o que pode originar defeitos de fabrico e paragens na produção. Por consequência, os custos associados a esses defeitos ou paragens na produção, ou são imputados ao preço de venda dos produtos, ou são descontados na margem de lucro.

É uma situação que atualmente ocorre em grande parte das empresas da EDP é o aumento de ligações de equipamentos mais eficientes e que incluem componentes da eletrónica de potência.

Frequentemente estas cargas são não-lineares, havendo por isso a necessidade de utilização de equipamentos para compensar essas não linearidades. Por exemplo, no caso de iluminação pública com lâmpadas de LED, os equipamentos utilizados são *conversores electrónicos de potência* para interconexão com a rede eléctrica. O número dos conversores da Electrónica de Potência (EP) utilizados, não pára de aumentar. Por consequência introduzem distorção harmónica de corrente, levando ao aumento da distorção da tensão de alimentação [2].

Para além da distorção das formas de onda, a presença de harmónicas nas linhas de transporte e distribuição de energia origina maiores perdas, problemas de interferências electromagnéticas (na língua inglesa *ElectroMagnetic Interference* EMI) com equipamentos de comunicação, bem como o mau funcionamento ou falha de outros equipamentos electrónicos ligados à rede de energia eléctrica. Existem dados provenientes de diversas fontes que indicam que os prejuízos económicos resultantes destes problemas são muito elevados e por isso a questão da qualidade da energia eléctrica entregue aos consumidores finais é hoje, mais do que nunca, objecto de grande preocupação [2]. De acordo com resultados de um inquérito europeu da qualidade da energia eléctrica, conforme se ilustram na Figura 4, ‘‘A qualidade de energia fraca é responsável por 50% do tempo de inatividade do equipamento na maioria das instalações.’’

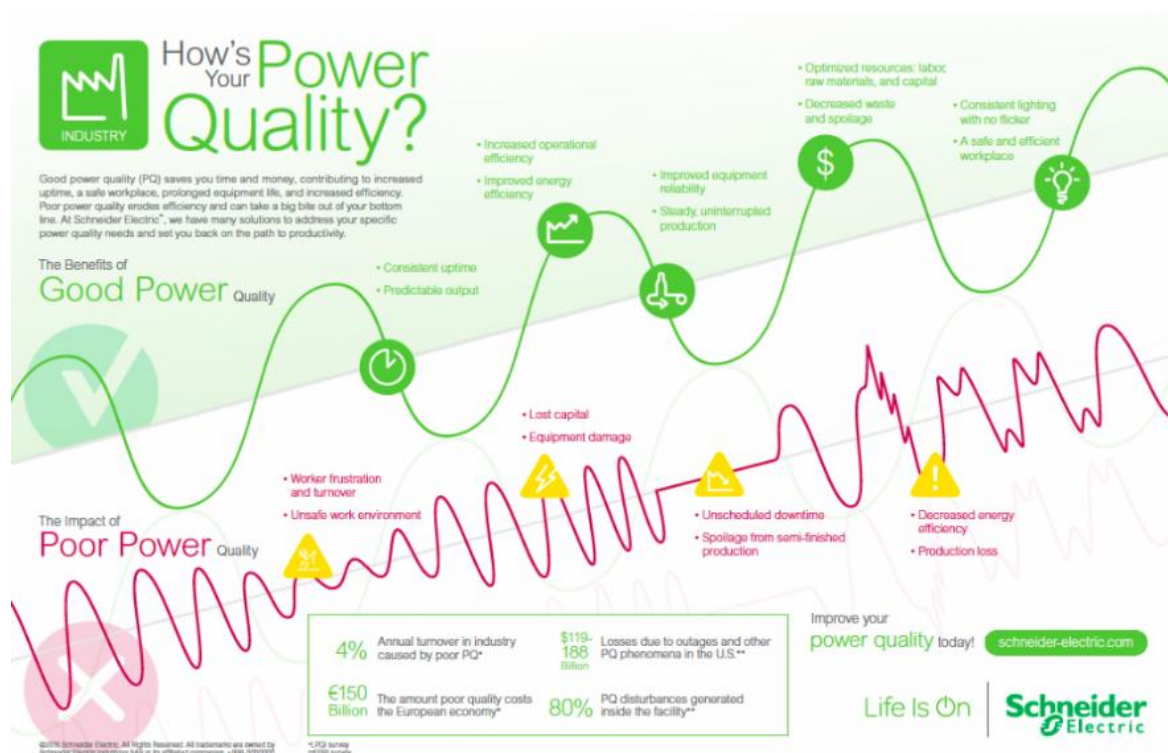


Figura 4 - A responsabilidade da fraca Qualidade de Energia [LPQI , 2009].

A não qualidade de energia resulta em inúmeros problemas tais como custos eléctricos elevados, perdas de produção, aumento do custo de manutenção, paragens do processo de produção, falhas de equipamentos, entre outros.

Por outro lado, a energia reativa é faturada segundo vários escalões, e que quanto mais o valor do factor de potência se afasta do valor unitário, maior é o valor pago pela parcela da energia reativa. Assim, para se reduzir os custos associados às taxas elevadas aplicadas à energia reativa, com o objectivo de se poupar na fatura da eletricidade, deve-se optar por uma solução que visa corrigir o factor de potência para um valor próximo da unidade, ao mesmo tempo que se garante que a QEE não é comprometida [2].

A liberalização no setor elétrico também contribui para aumentar o interesse por uma QEE superior, tanto pela parte dos distribuidores, como pela parte dos próprios consumidores. Uma vez que o consumidor pode escolher a empresa a contratar para o fornecimento de sua energia elétrica, os factores decisivos para a seleção do fornecedor são não só o preço da energia mas também a qualidade do serviço prestado. Do ponto de vista do fornecedor, visto que a liberalização impulsiona o aparecimento de novas empresas a concorrer pelo fornecimento do mesmo serviço, é cada vez mais importante o melhor serviço possível ao cliente.

1.4. Contextualização - consumo de energia

O consumo de energia elétrica está diretamente relacionado com o aumento de qualidade de vida das populações. Actualmente estima-se que 20% do consumo total de energia mundial esteja relacionado com sistemas de iluminação quer a nível de edifícios do sector dos serviços e das habitações, quer ao nível da iluminação pública, estradas, ruas e espaços públicos. Em particular, estima-se que a iluminação pública seja responsável por 0,95% do total de energia consumida mundialmente [3]. No caso particular de Portugal, a IP é responsável por 3% do total energia consumida. Figura 5 apresenta-se um gráfico com o andamento comparativo do consumo total de energia e do consumo de energia na iluminação de vias públicas em Portugal entre 1994 e 2014, de acordo com os dados que serviram foram recolhidos em 11/08/2016 [3].

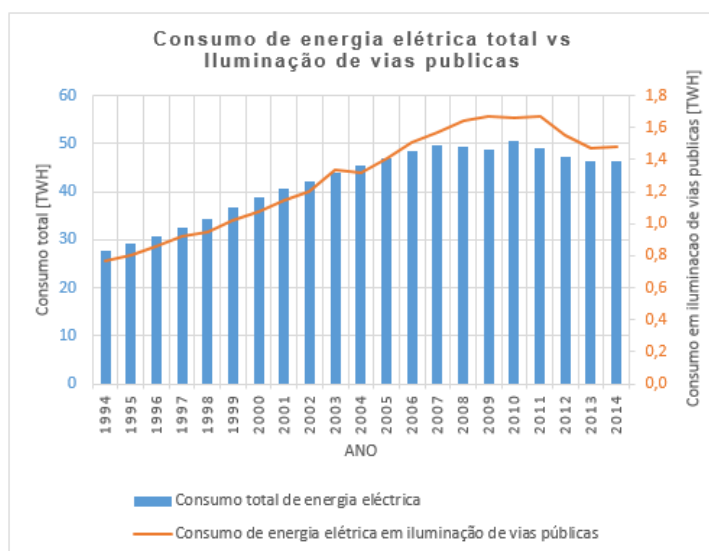


Figura 5 - Histórico do consumo total de energia elétrica em Portugal vs. iluminação de vias públicas.

Pode-se observar que em 2005 o consumo total de energia sofre uma estagnação acabando depois por descer ligeiramente até ao ano de 2014. Pelo contrário, a iluminação de vias públicas sofre um aumento a partir desse mesmo ano, até ao ano de 2011, existindo depois um decréscimo até 2014. Tal acontece devido à adoção de novas tecnologias na Iluminação Pública, como o caso do uso de LEDs. Estas novas técnicas e inovações utilizadas vêm reduzir o consumo, sendo mais económicas e permitindo assim gastos mais racionais.

Pode-se afirmar então que o aumento no consumo de energia na iluminação de vias públicas é diretamente proporcional ao consumo total de energia visto que resulta de uma maior preocupação com a segurança das populações, do aumento das áreas comerciais, de lazer e da melhoria das vias rodoviárias.

A estas constatações podem aliar-se diversas causas. No caso da diminuição do consumo total de energia elétrica devem identificar-se alguns factores essenciais: O aparecimento de uma crise financeira e consequente contração económica que leva a um esforço na redução de gastos, aliando-se também uma crescente consciencialização para a disponibilidade de equipamentos com melhores níveis de eficiência, permitindo manter os níveis de conforto mas obtendo uma redução do consumo com consequências positivas ambiental e financeiramente. O aumento do preço da energia será também um factor essencial na medida em que para manter os custos associados ao consumo de energia passou a ser necessária uma diminuição do seu consumo. A iluminação pública, de acordo com os dados de [3] e como é visível no gráfico da Figura 6, segue a mesma tendência dos outros setores, forçando os municípios juntamente com a EDP a fazer ajustes com vista a reduzir o consumo.

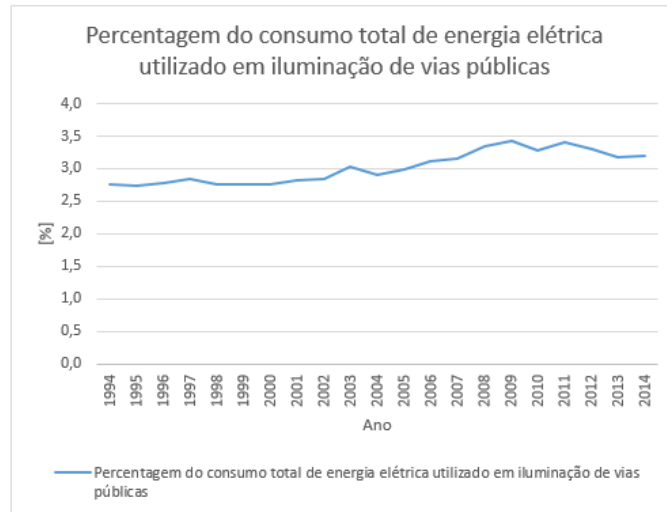


Figura 6 - Percentagem do consumo total de energia elétrica utilizado em iluminação de vias públicas.

Pode-se concluir que em Portugal a iluminação pública representa mais de 3% do consumo total da energia elétrica, como pode-se observar na Figura 7, correspondendo a cerca de 1,5 TWh. O número de pontos de luz em Portugal é de cerca de 4 milhões, tendo Portugal cerca de 10 milhões de habitantes, i.e., uma tendência de crescimento de 4% a 5% ao ano [5].

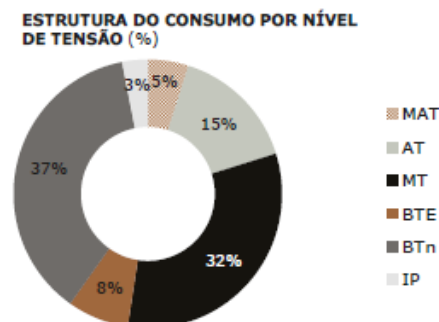


Figura 7 - Estrutura do consumo da energia por nível de tensão [EDP, 2015].

Aplicando o tarifário em vigor, 1,5 TWh corresponde a um custo de cerca de 150 M€. O gráfico apresentado na Figura 8 apresenta a evolução da tarifa associada à iluminação pública, de 2007 a 2012 [6].

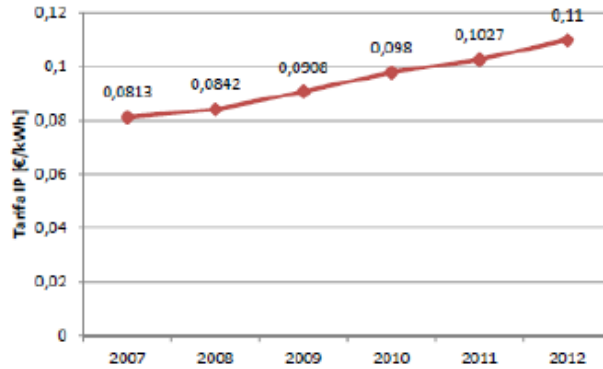


Figura 8 - Evolução da tarifa de IP em Portugal [INE, 2013].

Relativamente aos custos associados a um sistema de iluminação durante a sua vida útil, podem ser divididos em *custos de investimento inicial* e *custos operacionais manutenção e energia consumida*. Ao analisar a Figura 9, constata-se que após 25 anos de vida útil de um sistema de IP típico, os custos com a manutenção rondam os 50% e o consumo de energia eléctrica, obviamente, é a fracção também dominante do custo do ciclo de vida [4].

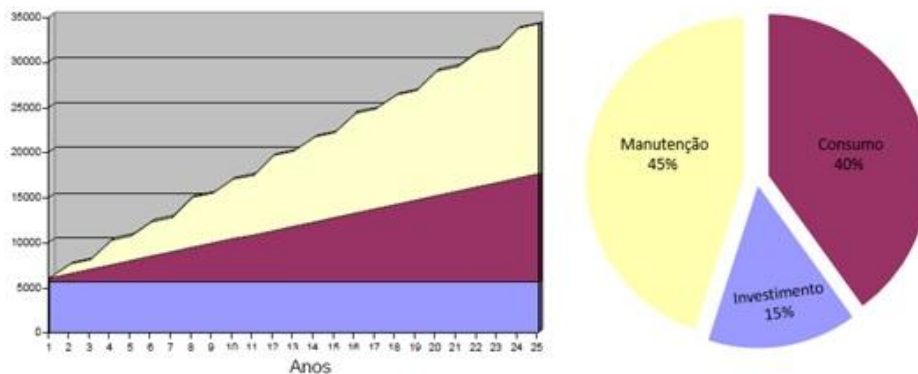


Figura 9 - Distribuição dos custos durante a vida útil do sistema de iluminação [EDP, 2009].

Os números apresentados, para além de serem elevados ainda se estima subirão rapidamente, a menos que sejam tomadas medidas correctivas. Isto deve-se aos efeitos acumulativos que a perda de qualidade pode impor, seja pela redução da vida útil de dispositivos, seja pela limitação da capacidade efectiva dos equipamentos ou mesmo mau funcionamento.

Para reduzir estes valores torna-se assim necessário que os sistemas possibilitem reduzir o consumo de energia eléctrica (i.e., sistemas mais eficientes) garantindo a mesma segurança e conforto mas também ir ao encontro de sistemas de IP inteligentes, com menores custos de manutenção e operação.

1.5. Organização da Dissertação

Este relatório encontra-se dividido em oito capítulos.

No capítulo 1, é feita uma breve introdução, onde se fala um pouco sobre a empresa EDP Distribuição e os principais serviços da DRCN, onde se apresenta a contextualização engloba uma caracterização do consumo energético da IP em Portugal, e os objectivos que se pretendem atingir neste trabalho.

No capítulo 2 apresenta um conjunto de conceitos fundamentais relacionados com a iluminação pública, a evolução histórica das lâmpadas utilizadas no sistema da iluminação. É feita uma descrição de cada tipo de lâmpada e efetuada uma comparação entre as diferentes tecnologias, no sentido de avaliar das opções mais vantajosas em termos económicos e de eficiência energética. Relativamente às luminárias, é feita uma análise das características que as mesmas devem apresentar para que, em conjunto com o tipo de lâmpada adequada, seja possível obter-se uma optimização da sua utilização.

No capítulo 3 é feito um levantamento do estado da arte de um conjunto de equipamentos essenciais que vão servir de suporte para a concretização deste projecto. É também feita uma análise do estado atual da implementação do sistema com lâmpadas LED e das características destes equipamentos.

No capítulo 4, é realizada uma análise relativa aos conceitos fundamentais inerentes ao conceito QEE, nomeadamente as perturbações que degradam a qualidade de energia. São também apresentadas as normas de qualidade de energia, expondo as entidades reguladoras e governamentais associadas à sua realização e implementação.

No capítulo 5, é feita uma introdução aos programas para a sustentabilidade energética atualmente existentes e é feita uma síntese do conceito de eficiência energética, abordando o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) e os objectivos que Portugal se propõe atingir.

No capítulo 6, é apresentado o caso de estudo, ou seja, faz-se uma descrição detalhada da situação atual do concelho de Braga, fazendo referência aos números de focos em serviço, consumos e factura energética.

O capítulo 7 é apresentada a solução proposta, bem como, todo o funcionamento do sistema implementado, os requisitos definidos para a concretização do projecto, o modelo proposto para a monitorização a realizar e o progresso efectuado ao logo do desenvolvimento do projecto. Faz

ainda uma validação do trabalho contra os objetivos propostos e define procedimentos futuros necessários a uma validação efetiva.

No capítulo 8 estão referidas as conclusões retiradas do caso de estudo e são referidas algumas indicações sobre o trabalho futuro.

2. Conceitos Fundamentais

A gestão da iluminação pública tem sido nos últimos anos um tema de crescente preocupação e atenção conjunta por parte das Câmaras Municipais e da EDP-D, na procura de novas tecnologias que permitam a gestão da prestação deste serviço e a utilização de equipamentos mais eficientes que conduzam a uma redução de consumos e custos correspondentes, sem perda dos níveis de iluminação.

Neste capítulo são expostos conceitos e normas considerados fundamentais à compreensão do estado da arte e da proposta apresentada nesta dissertação.

2.1. Grandezas e conceitos luminotécnicos

Um sistema de iluminação deve ser adequado à tarefa a realizar, uma vez que é um factor essencial para o desempenho humano, além de contribuir para o bem-estar físico e psicológico. Estes sistemas devem ser projetados tendo em conta alguns parâmetros que definem uma iluminação de qualidade e adequada à atividade a realizar [7, 8].

Fluxo luminoso: é a quantidade total de energia luminosa, emitida por segundo por uma fonte de luz. É designado pela letra F e é expressa em lumens. O valor do fluxo luminoso permite saber a quantidade de luz emitida pela fonte num intervalo de tempo.

Intensidade luminosa: é a concentração de luz numa dada direção específica, irradiada por segundo. É designado pela letra I. A unidade é a candela (cd). A intensidade luminosa pode ser definida como o fluxo luminoso numa dada direção, irradiada por unidade de ângulo.

Iluminância: é a densidade de fluxo incidente numa dada superfície. É designado pela letra E, a unidade é o lux (lx). Um lux é igual a um lúmen por metro quadrado (lm/m²).

A iluminância é independente da direção de onde o fluxo luminoso atinge a superfície. A iluminância é um dos factores mais importantes a ter em conta no dimensionamento de uma instalação de iluminação, pois deve ser adequada ao local. A iluminância de uma superfície não depende do tipo e estado da superfície (material, textura, rugosidade, cor mais clara ou mais escura, estado seco ou molhado) pois é determinada somente pelo fluxo luminoso incidente e pela área da superfície. Se substituirmos a superfície de uma estrada por outra mais clara ou escura, de 40 material diferente ou um piso seco passar a molhado a iluminância é a mesma, pois o fluxo incidente não se alterou. Há dois tipos de iluminância:

- Iluminância média (E_{med}): média aritmética de todos os pontos de iluminância calculados sobre a superfície da via. A unidade é Lux.
- Iluminância mínima (E_{min}): é o valor mínimo de iluminância calculado sobre a superfície da via. A unidade é Lux.

Factor de uniformidade U: é uma relação entre a iluminância mínima e a média de uma determinada área. Resulta em um valor adimensional variando entre zero e a unidade, que indica como está a distribuição da luminosidade na superfície aferida.

Factor de Manutenção FM: o factor de manutenção de uma instalação é o rácio da iluminância num determinado momento $E(t)$, com a iluminância inicial E_0 . A Figura 10 ilustra este conceito.

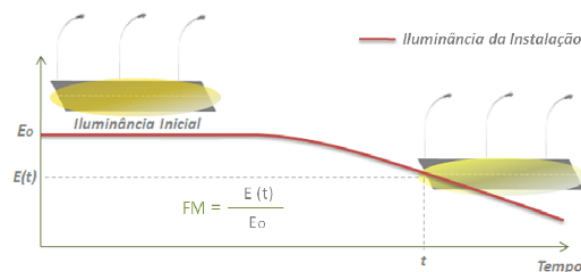


Figura 10 - O factor de manutenção de instalação [EDP, 2010].

O valor do FM poderá afectar significativamente a potência da fonte de luz a instalar, bem como o número de luminárias iluminância/iluminância especificados.

$$FM = FMLL \times FSL \times FML$$

FM é um valor indicativo: alterações do factor indicativo com nível de poluição por poeira ou intervalo de limpeza diferentes. Deve ser tanto maior quanto possível.

Factor de Manutenção da Luminosidade da Lâmpada FMLL: é dado pelo rácio entre o fluxo luminoso da lâmpada num dado momento da sua vida $\Phi(t)$ e o fluxo luminoso inicial Φ_0 . [EN 12665:2002]. A Figura 11 ilustra este conceito.

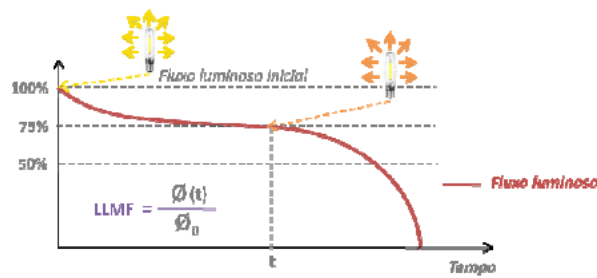


Figura 11 - O factor de manutenção da luminosidade da lâmpada [EDP, 2010].

Factor de Sobrevivência da Lâmpada FSL: lâmpada é definido pela fracção do número total de lâmpadas que continuam a funcionar num dado momento e sob determinadas condições. [EN12665:2002]. A Figura 12 ilustra este conceito.

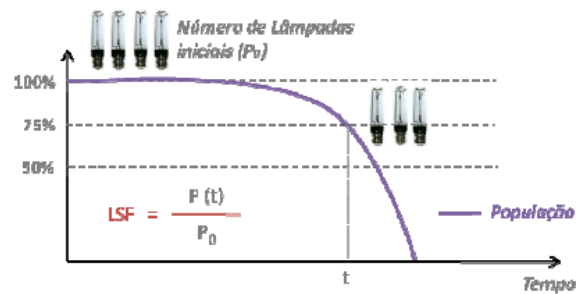


Figura 12 - O factor de sobrevivência da lâmpada [EDP, 2010].

O factor de sobrevivência de uma lâmpada depende bastante da quantidade de horas de funcionamento.

Factor de Manutenção da Luminária FML: O factor de manutenção da luminária é o rácio do LOR^3 de uma luminária num dado $LOR(t)$, com o LOR dessa mesma luminária no seu início de vida LOR_0 . A Figura 13 ilustra este conceito.

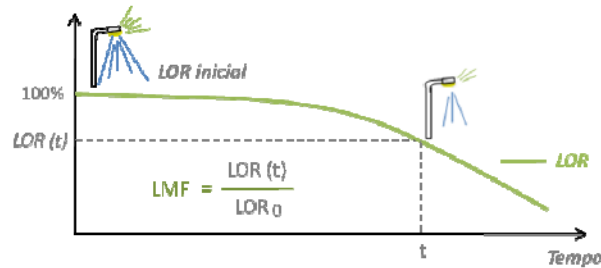


Figura 13 - O factor de manutenção da luminária [EDP, 2010].

Luminância: corresponde ao fluxo luminoso emitido por unidade de área de uma superfície numa direção específica. Esta mede a luz tal como é percebida pelo olho humano. A percepção de todas as superfícies e objetos que estão no nosso campo de visão deve-se à sua luminância. As superfícies, com diferentes propriedades de reflexão terão a mesma iluminância, mas luminância diferente. O principal critério requerido pela norma para aplicações rodoviárias de iluminação é a luminância da superfície da estrada. O bom conhecimento das características da reflexão da luz nos pavimentos rodoviários é, portanto, de grande importância para alcançar um design de iluminação precisa. A unidade de luminância é o cd/m^2 . Se a superfície é substituída por outra de material diferente, mais clara ou mais escura ou se o piso passar de seco a molhado os valores da luminância alteram-se.

As luminárias em forma de esfera, conforme se ilustra na Figura 14 e que constituem um grande clássico da iluminação decorativa na nossa paisagem urbana, desprovidas do mínimo sistema ótico, difundindo a luz em todas as direções, encontram, na última geração de luminárias, sistemas equipados com uma óptica de qualidade mais respeitadora do ambiente [9].



Figura 14 - Exemplo de uma luminária globo ineficiente e eficiente.

³ O rácio de saída do fluxo luminoso (LOR) pode ser entendido como: $LOR = \frac{\phi \text{ saída da luminária}}{\sum \phi \text{ fonte de luz individual}}$

2.2. Características das lâmpadas

A lâmpada é o componente cuja funcionalidade é a produção de radiação eletromagnética no espectro visível. São vários os tipos de lâmpadas que podem ser utilizadas como fontes luminosas num sistema IP. Estas distinguem-se mediante as suas características técnicas e económicas e os seus parâmetros de desempenho, nomeadamente [7, 8]:

- Rendimento luminoso;
- Temperatura de cor;
- Índice de restituição de cor;
- Luminância;
- Duração de vida média.

Assim, antes de efetuar um estudo sobre os tipos de lâmpadas utilizadas, será útil estudar estas características.

- **Rendimento luminoso ou eficiência luminosa (lm/W):** é o quociente entre o fluxo luminoso absorvido pela lâmpada e a potência elétrica absorvida pela lâmpada [102]. A unidade de medida é o lúmen por Watt (lm/W). Uma lâmpada proporciona uma maior eficiência luminosa quando a energia consumida para gerar um determinado fluxo luminoso é menor do que da outra;

Nota: para uma fonte de luz que transforma, sem perdas, toda a potência elétrica consumida em luz num comprimento de onda 555 nm, terá o maior rendimento possível no valor 683 lm/W.

$$\eta = \frac{\Phi}{P} \left(\frac{lm}{W} \right)$$

Os equipamentos fotométricos e os medidores de luz são geralmente calibrados conforme a sensibilidade espectral dos cones, ou seja, na visão fotópica. Assim, o fluxo luminoso das fontes de luz é avaliado somente em termos da sua resposta fotópica. Este rácio é também muitas vezes utilizado como o Índice de Eficiência Energética.

- **Temperatura de cor (K):** em termos visuais é bastante difícil a avaliação comparativa entre a sensação da tonalidade de cor das diversas lâmpadas. Com efeito, definiu-se o conceito de Temperatura de Cor (Kelvin) para classificar a luz. Elevadas temperaturas de cor correspondem a cores frias, logo, quanto mais elevada for, mais fria será a cor. Na Tabela 2 encontram-se alguns exemplos da temperatura de cor e respetiva aparência [EDP, 2010].

No caso do decisor optar pela luz branca, não deverão ser utilizadas fontes cuja temperatura de cor ultrapasse os 4500 K \pm 10%.

Tabela 2 - Temperaturas de cor.

Temperatura (K)	Aparência	
$T < 3300$	Luz quente (branca alaranjada)	
$3300 > T > 5000$	Luz intermediária (branca)	
$T > 5000$	Luz fria (branca azulada)	

- **Índice de Restituição de cor (IRC):** restituição de cores é um índice a capacidade de uma fonte luminosa restituir fielmente as cores de um objecto ou de uma superfície iluminada. É expressa por um índice chamado índice de restituição de cores (IRC). Este índice vem expresso por um número compreendido entre 0 e 100. A Tabela 3 seguinte indica a classificação do índice de restituição de cores em vários grupos:

Tabela 3 - A classificação do índice de restituição de cores.

Grupo de restituição de cores	IRC	
1	A	> 90
	B	80 – 90
2	A	70 – 80
	B	60 – 70
3		40 – 60
4		20 - 40

Faço notar que a temperatura de cor apenas se refere à sua cor e não à sua composição espectral que irá influenciar a capacidade de reproduzir a cor do objeto. Assim se explica o facto de lâmpadas com a mesma temperatura de cor possuírem um índice de restituição de cor diferente.

- **Duração de vida média:** é um dado muito importante na especificação de sistemas de iluminação é a vida dos equipamentos. Quanto maior a vida de uma lâmpada, melhor é o sistema, pois implica menor necessidade de manutenção nas instalações.

Vida média ou vida útil? Os fabricantes de lâmpadas fornecem a vida mediana e/ou a vida útil, porém o conceito de ambas nem sempre é entendido de maneira correta. Muitos o desconhecem e acabam comparando os dois tipos de vidas como se fossem a mesma coisa, mas não são. A *vida mediana* de lâmpadas corresponde à vida em horas quando, em uma determinada amostragem, 50% das lâmpadas falharam. A *vida útil* é definida como o tempo em horas após a depreciação de uma percentagem de seu fluxo luminoso inicial, por efeito de queima ou depreciação. Esta depreciação é definida em função do tipo de lâmpada e geralmente varia de 10% a 30%. Dessa forma, a *vida mediana* é sempre maior que a vida útil e a comparação entre as duas grandezas para analisar qual seria o melhor produto não pode ser feita de maneira direta. A Figura 15 ilustra estes conceitos.

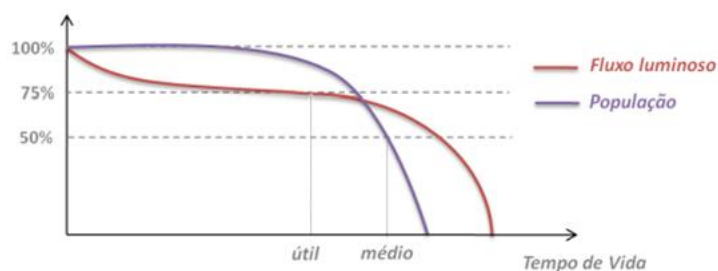


Figura 15 - Tempo de vida médio e útil de uma lâmpada.

A determinação das vidas varia em função dos ciclos de liga-desliga e em função do tipo de balastro (eletrônico ou eletromagnético) que é utilizado com a lâmpada. Outros factores que podem afetar o tempo de vida destes dispositivos, entre os quais se podem contar a tensão de funcionamento, a temperatura ambiente e a presença de vibrações. Um de diversos factores que pode diminuir significativamente a vida das lâmpadas é a *condição térmica de operação* que tem como implicações diretas disto é a redução do fluxo luminoso e a redução da vida da lâmpada.

Muito embora haja vários factores que podem condicionar a opção por determinado tipo de lâmpada, um dos mais importantes é, sem dúvida, a sua eficiência luminosa.

2.3. Tipos de lâmpadas

Desde a introdução das lâmpadas incandescentes que várias tecnologias foram desenvolvidas para sistemas de iluminação. Assim foram surgindo novos tipos de lâmpadas com outras características luminotécnicas e, principalmente para os tempos de hoje, menor consumo de energia e consequentemente, preservação ambiental [9]. As lâmpadas podem ser agrupadas nas seguintes categorias:

- Lâmpadas Incandescentes;
- Lâmpadas de Descarga;

- Lâmpadas de Indução;
- LED's
- Plasma

A Figura 16 mostra a evolução técnica e tecnológica das lâmpadas, que irão discutidas nos subcapítulos seguintes.

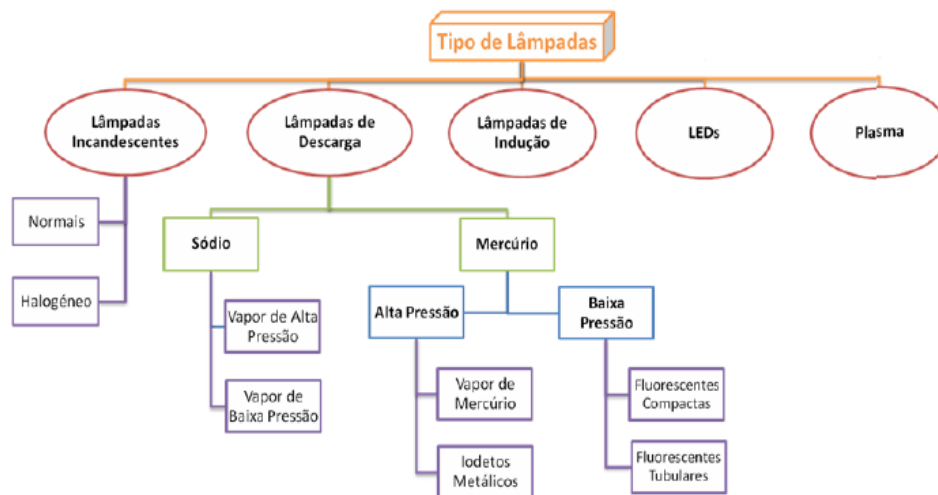


Figura 16 - Diagrama com os tipos de lâmpadas existentes [9].

2.3.1 Incandescentes

Este tipo de lâmpada funciona com base no fenómeno de incandescência, emitindo luz devido a elevada temperatura de um corpo (filamento). Consiste num bolbo de vidro cheio de um gás inerte, nomeadamente Árgon, Azoto ou Crip-ton, com um filamento de Tungsténio no seu interior, como se pode observar na Figura 17. Este filamento é dimensionado para suportar uma corrente elétrica que o irá aquecer até temperaturas de 2000 a 3300 K.

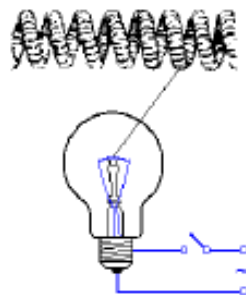


Figura 17 - Constituição de uma lâmpada incandescente [10].

As características destes dispositivos são as seguintes [9, 10]:

- Rendimento baixo: 10 lm/W. Cerca de 90% da energia consumida por este tipo de lâmpadas é perdida sob a forma de calor, fazendo com que sejam extremamente ineficientes;
- Muito boa restituição de cores (na ordem dos 100%);
- Reduzida duração de vida média: 1000 horas;
- Temperatura de cor: 2700 K;

2.3.2 Lâmpadas de descarga

A descarga elétrica num gás (entre dois eléctrodos) produz a excitação dos electrões, os quais, conseqüentemente emitem luz.

Vapor de Mercúrio

A lâmpada de Vapor de Mercúrio (High Pressure Mercure - HPM) como a apresentada na Figura 18, tem um funcionamento que tem por base a descarga entre dois eléctrodos imersos numa atmosfera de árgon com uma pequena quantidade de mercúrio. Para além dos dois eléctrodos principais, entre os quais se realiza a descarga, existe ainda um terceiro eléctrodo - chamado auxiliar ou de arranque – cuja função é ionizar o gás árgon para que a descarga se inicie. Desta forma deixa de ser necessário um pico de ignição, ao contrário do que acontece, por exemplo, nas lâmpadas fluorescentes. Durante o funcionamento é necessária, no entanto, a utilização de um balastro para limitar a corrente, devido à baixa impedância que apresenta após o arranque [9, 10].

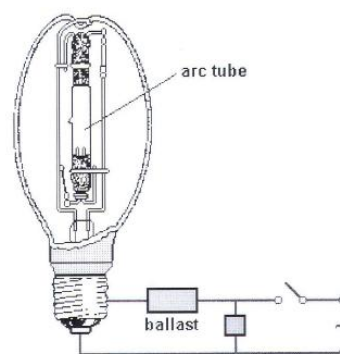


Figura 18 - Ilustração de lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão [10].

As características são destes dispositivos são resumidas seguidamente:

- rendimento: 36 a 60 lm/W;
- índice de restituição de cores: 40 a 57;
- duração de vida média: 10 000 a 12 000 horas;
- temperatura de cor: 3550 a 4200 K;

Compactas fluorescentes

A lâmpada fluorescente, ilustrada na Figura 19, corresponde a uma lâmpada de vapor de mercúrio de baixa pressão. Apresentam-se como a tecnologia de eleição para a substituição das lâmpadas incandescentes, atualmente em *phase-out*, devido a factores de forma muito semelhantes. A descarga emite radiação ultravioleta que é transformada em radiação visível na camada fluorescente que reveste o interior do tubo de descarga. Nesta substituição direta, o custo inicial ligeiramente mais elevado é largamente compensado pela muito maior eficiência (consome apenas cerca de 20% da energia).

Neste contexto compreende-se que a taxa de utilização deste tipo de lâmpadas no mercado da iluminação pública é baixa, sendo quase exclusivamente utilizadas nos globos dos parques e jardins (espaços verdes públicos) ou em zonas para efeitos decorativos.

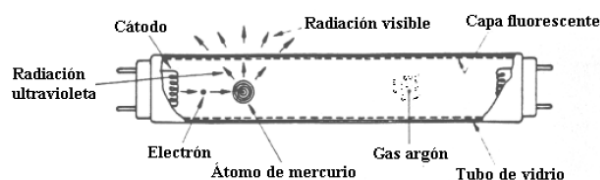


Figura 19 - Lâmpada fluorescente [10].

Nestas lâmpadas podem distinguir-se duas tipologias:

- **Integradas:** Neste caso a lâmpada e o balastro são uma peça única, estando o balastro na base da lâmpada. Apresenta-se como o substituto ideal para lâmpadas incandescentes visto que dispõe de casquilhos de rosca do tipo (Edison) E14 e E27, substituindo-se assim facilmente, sem qualquer intervenção adicional na quase totalidade dos casos. O seu preço foi reduzido drasticamente nos últimos anos, tornando a sua utilização bastante rentável, ainda que mais virada para a iluminação de interiores [9, 10].
- **Modulares:** Neste caso o balastro e a lâmpada são dois objetos separados, podendo ser substituídos em ocasiões separadas. Em termos de manutenção apresenta mais vantagens visto que é possível substituir a lâmpada sem substituir o balastro, que apresenta durabilidades cinco a seis vezes superiores.

Vapor de Sódio de alta pressão

A lâmpada de Vapor de Sódio de Alta Pressão VSAP trata-se de uma lâmpada de descarga de alta intensidade cuja criação teve como objetivo o desenvolvimento de uma lâmpada de elevado rendimento. A forma de utilização encontra-se representada na Figura 20.

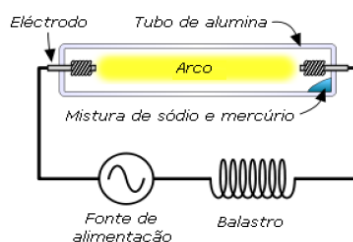


Figura 20 - Lâmpada de vapor de Sódio de alta pressão [10]

No interior possui uma mistura de sódio e mercúrio que é vaporizada para potenciar um arco entre os eléctrodos, conforme se ilustra na Tabela 4.

Tabela 4 - Elevação da tensão de arco [4].

Potência da lâmpada (w)	Acréscimo máximo de tensão (V)
70	2
100	6
150	7
250	10

O resultado é a temperatura alta na ordem dos 700°C e, conseqüentemente, a pressão do vapor serão tanto maiores quanto maior for a potência da lâmpada. A resistência eléctrica da lâmpada é inversamente proporcional a estes valores, diminuindo com o aumento da pressão. Existe, no entanto, um fenómeno de degradação que provoca um aumento de potência devido ao aumento de tensão no arco entre os eléctrodos. Este fenómeno que faz com que lâmpadas com mais tempo de utilização, tipicamente na segunda metade do seu tempo de vida, tenham dificuldades em arrancar com tensões reduzidas.

Na rede de IP em Portugal, utilizando lâmpadas conforme a zona em que está inserida, e também utilizam-se as luminárias, com índices de protecção IP54; IK08 (baixa poluição) e IP65; IK08 (alta poluição) [4]. De um modo resumido podemos fazer a seguinte distinção:

- Nas zonas rurais utilizam-se as VSAP 70 e 100W
- Nas zonas Urbanas utilizam-se as VSAP 70, 100, 150 e 250W

As características deste dispositivo são essencialmente as seguintes:

- Rendimento: cerca de 50 lm/W;
- Índice de restituição de cores: 25 a 60; vapor de sódio de luz branca: IRC = 80;
- Temperatura de cor: 1900 a 2500 K;
- Duração de vida média: 8000 horas; A Osram já produz lâmpadas que duram até 32000 horas.

- Preço mais elevado do que as de mercúrio mas com maior rendimento luminoso;

O gráfico da Figura 21 ilustra a eficácia das lâmpadas de VSAP [4].

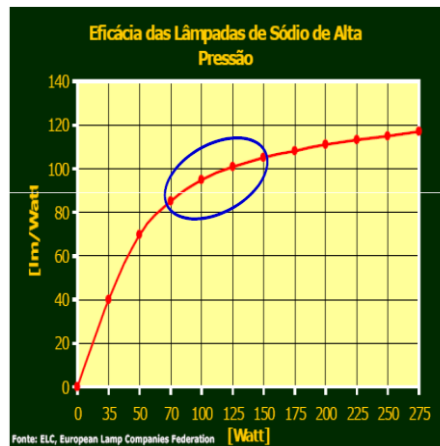


Figura 21 - Eficácia das lâmpadas de VSAP [EDP, 2009].

Vapor de Sódio de baixa pressão

Estas lâmpadas têm no seu interior uma atmosfera de sódio, Néon e Árgon, tendo como princípio de funcionamento a descarga num tubo de vidro especial em forma de U. As suas características são as seguintes:

- Lâmpadas de maior rendimento luminoso, atingindo os 180 lm/W.
- Índice de restituição de cores: praticamente nula;
- Temperatura de cor: 2800 K;
- Duração de vida média: 5000 – 6000 horas;
- Tempo de arranque e de re-arranque: 10 minutos e instantâneo;
- A luz emitida é monocromática amarela.

Lâmpada de Iodetos Metálicos

Esta tecnologia, lâmpada de mercúrio com iodetos metálicos, desponta como um aperfeiçoamento à tecnologia de vapor de mercúrio diferindo pela presença de iodetos metálicos e desempenho muito mais elevado ao nível de IRC e eficiência, sendo 4 a 5 vezes melhor. Para efetuar o arranque desta lâmpada é necessário um arrancador adequado que gera um pico de tensão muito elevado (na ordem dos 5000 V). No entanto existem versões que dispõem de um elétrodo auxiliar (como nas lâmpadas de mercúrio) ou um arrancador interno, tipo *starter* (como nas lâmpadas fluorescentes). Tal como as lâmpadas de vapor de Sódio, esta lâmpada encontra-se disponível numa grande variedade de formatos. Comparativamente às lâmpadas vapor de Sódio de alta pressão, oferecem as mesmas vantagens, mas têm características diferentes. Possuem uma maior gama de potências e

uma cor mais branca e fria. São utilizadas quando é necessário uma boa eficiência e um bom IRC. Porém a aparência de cor é prejudicada pela idade e têm menor vida útil e rendimento.

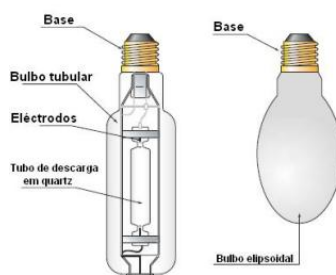


Figura 22 - Detalhes construtivos de uma lâmpada de iodetos metálicos.

As principais características deste tipo de lâmpadas são [9, 10] as seguintes:

- Rendimento Luminoso: até 80 lm/W; lm/W;
- Temperatura de cor: 3000 a 7000 K;
- IRC: 85 a 95;
- Duração de vida média: 3000 a 9000 horas;

2.3.3 Indução

Uma inovação recente da indústria da iluminação foi a chamada lâmpada fluorescente de indução, conforme se ilustra na Figura 23, e cujo princípio de funcionamento se baseia na excitação do mercúrio e dos gases nobres que se encontram no seu interior. Através da aplicação de um campo magnético variável de elevada frequência é produzida uma radiação ultravioleta que é convertida em luz visível usando revestimentos com sais apropriados, tal como acontece nas lâmpadas fluorescentes.

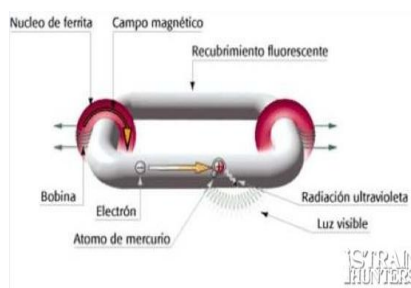


Figura 23 - Lâmpada de indução.

A lâmpada fluorescente de indução, não tem eléctrodos internos, sendo constituída por uma ampola com mercúrio e com uma bobina, que excita o mercúrio, ou simplesmente por um tubo fechado com duas bobinas enroladas nas extremidades da lâmpada. Em resumo, as características são as seguintes:

- Rendimento luminoso: de 100 a 110 lm/W;
- Índice de restituição de cores = 80;
- Temperatura de cor: 2700 K a 4000 K;
- Duração de vida média: 60000 horas;
- Necessitam de aparelhagem auxiliar: gerador de alta frequência externo porque estes tipos funcionam a alta frequência, o que permite obter uma luz confortável e sem oscilações;
- Industriais muito altas com manutenção difícil (difícil acesso às armaduras de iluminação);

As lâmpadas de indução possuem uma boa eficiência energética e um IRC relativamente elevado. A sua principal vantagem é sem dúvida a duração, dado que é muito elevada. Assim, em locais onde a manutenção frequente seja indesejável (por ser mais cara e perigosa, e.g. em postes de iluminação de difícil acesso ou junto a linhas de AT e MAT), estas lâmpadas podem ser uma boa solução. Adicionalmente, o seu fluxo luminoso é muito pouco dependente da temperatura. Tem a desvantagem de, atualmente, ainda não ser possível efetuar o *dimming* desta lâmpada e apenas funcionar com balastos eletrónicos especiais de alta frequência.

2.3.4 Lâmpada de LED

O díodo emissor de luz (LED – *Light Emitting Diode*) transforma a energia eléctrica em luz num cristal de semiconductor, conforme se representa na Figura 24. Tal transformação é diferente da encontrada em lâmpadas convencionais (incandescentes, descarga e indução), pois nos LEDs a transformação de energia eléctrica em luz é efectuada dentro da matéria sólida, daí que seja também denominada de iluminação em estado sólido (na língua inglesa -*Solid State Lighting SSL*).

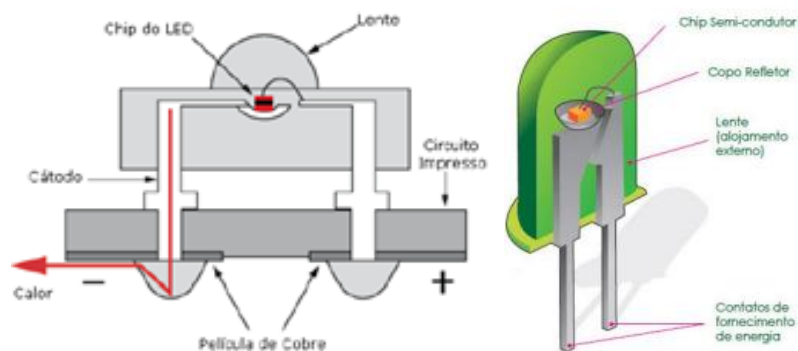


Figura 24 - Estrutura de um LED (esquerda), Interior do LED (direita).

O LED (ilustrado na Figura 25) é constituído por um *chip* semiconductor, que é encapsulado em material plástico, cerâmico ou resina. Geralmente um segundo controlador ótico (lente ou difusor) é introduzido na cápsula. Desta forma, o rendimento ótico do sistema será definido quer pela forma e tamanho do LED, quer pela configuração da lente e da sua distância ao *chip*.

O funcionamento de um LED só é possível com o uso de uma fonte de alimentação especial, que irá converter a tensão alternada da rede em tensão contínua. Dependendo da sua polarização, e de acordo com o que se representa na Figura 25, o LED irá permitir, ou não, a passagem de corrente elétrica gerando, ou não, luz. Os elétrons movem-se da região N, através da junção PN do díodo semiconductor, até atingirem a região P, onde se recombinam com cargas positivas (lacunas).

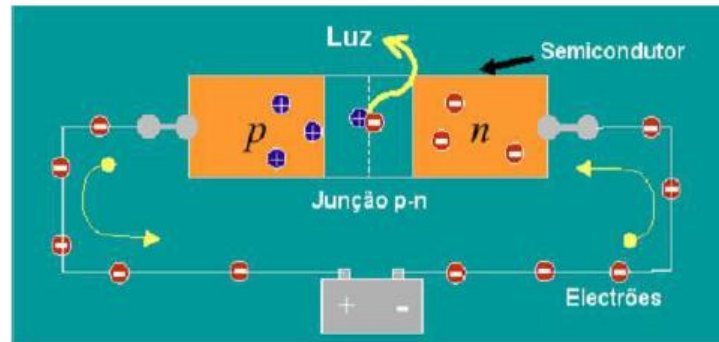


Figura 25 - Representação interna do princípio de funcionamento de um LED.

O LED branco de alta potência ou de alto brilho tem sofrido uma grande evolução nos últimos anos, sendo uma grande aposta por parte de empresas como a CREE, Philips (LUMILEDS) e OSRAM. Actualmente existem duas técnicas para criar luz branca com LED: (i) utilização de três LEDs numa combinação RGB ou (ii) através de um LED de cor azul com uma camada de fósforo amarela.

Há diversas cores disponíveis para esses dispositivos, conforme se representa na Figura 26, sendo que cada uma delas liberta diferentes quantidades de energia de acordo com o material do semiconductor. Existem dois sistemas de materiais usados para produzir LEDs em todas as cores:

- Red/Orn/Amber: AlInGaP
- Green/blue: InGaN

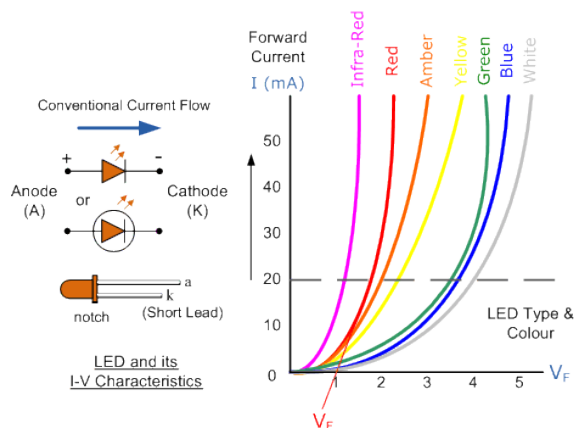


Figura 26 - Curva Característica I-V do LED [CREE].

Os LEDs, devido ao seu fluxo direcionado, conseguem atingir poupanças de energia entre 50 a 70% quando comparados com as lâmpadas convencionais de mercúrio e vapor de sódio. Adicionalmente, não requerem um tempo de espera para atingir o nível de fluxo luminoso máximo. Possuem ainda outras vantagens tais como: direccionalidade, menor fragilidade e suscetibilidade a atos de vandalismo, tempo de vida útil bastante superior, melhor efeito visual com disponibilidade de uma grande variedade de cores, não necessita de tempo de aquecimento, mais adequado para *dimming* permitindo reduções muito superiores às das lâmpadas convencionais [7].

2.3.5 Lâmpada de plasma

A lâmpada de plasma (*Light Emitting Plasma LEP*), conforme se representa na Figura 27, é uma lâmpada que utiliza uma fonte de alta frequência para ionizar uma ampola carregada com gás Argon. Pelo facto de utilizar uma fonte geradora de altas frequências e utilizar o fenómeno de ionização de um gás, a gestão de emissão de interferências electromagnéticas e a temperatura são dois factores muito problemáticos, que terão que ser equacionados na utilização desta tecnologia. Neste sentido, as empresas fabricantes destas ampolas fornecem manuais de desenvolvimento para garantir que as emissões de EMI fiquem contidas dentro da óptica da luminária e para que haja uma correcta dissipação do calor [12].

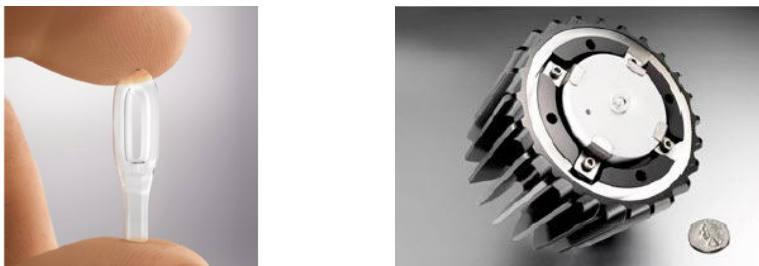


Figura 27 - Lâmpada de plasma [EDP].

Outros problemas que foram endereçados a esta tecnologia foram a:

- Necessidade de ter o gerador de altas frequências o mais perto possível da empola;
- Impossibilidade de utilizar sistemas ópticos devido à utilização do fenómeno de incandescência para gerar energia luminosa;
- Redução de fluxo até apenas 20% da sua capacidade máxima, tal como na lâmpada de indução.

2.4. Conceitos básicos associados à utilização do LED

Neste subcapítulo vamos abordar as principais vantagens e desvantagens do LED e comparação entre todas fontes de luz que já apresentadas atrás. Além disso vamos abordar a função do driver do LED.

2.4.1 Vantagens do LED

Os LEDs possuem dimensões reduzidas e por isso podem ser utilizados em luminárias mais compactas. O efeito da vibração nos restantes tipos de lâmpadas em geral reduz sua vida e complica seu funcionamento e, no caso dos LEDs, o desempenho é melhorado e a vida útil aumentada consideravelmente, já que esse efeito não se faz presente. Isso se deve ao fato de não possuir filamentos ou partes susceptíveis de avariar e também por funcionar com um *chip* muito reduzido, não evitando assim que os impactos vibratórios causem avarias.

O LED tem uma excelente saturação de cor, emite um comprimento de onda, gerando a luz numa frequência determinada e específica. Consequentemente, numa única cor de luz, e por isso mesmo saturada, ou seja, mais pura. O vermelho é bem definido assim como o azul, ou restante cores. A luz do LED é direcionada, e por isso há um melhor aproveitamento dessa luz dirigida na grande maioria das aplicações e.g. para o ambiente com a utilização de ópticas específicas.

A característica mais marcante do LED é sem dúvida a sua vida útil muito longa. Esta característica é muito importante pois reduz a necessidade de trabalho de manutenção, e promove a economia e preservação do meio ambiente [13].

Ao contrário das lâmpadas de descarga, que também são económicas e de vida relativamente longa, o LED não sofre diminuição na sua vida útil decorrente do número de manobras de ligar/desligar. Contrariamente numa lâmpada fluorescente, por exemplo, quanto maior o número de reacendimentos menor será sua durabilidade e, em sentido contrário, quanto menos for ligada e desligada, maior será sua vida útil. Efectivamente o limite operacional de ligar/desligar LED está subordinado apenas aos equipamentos auxiliares que, por incluem componentes eléctricos e electrónicos, se deterioram mais rapidamente para as mesmas manobras e com as operações repetidas. Efectivamente o LED apresenta uma vida típica muito elevada e independente do número de manobras de liga/desliga [13].

Como os LEDs produzem luz fria, existe a possibilidade de utilizá-los em várias situações que, até o seu surgimento, eram impossíveis ou requeriam técnicas e truques a fim de que a luz não

prejudicasse o que estava iluminando. Talvez o exemplo mais acabado diga respeito aos museus, uma vez que tanto o UV como o IV⁴ são radiações que prejudicam irreversivelmente os objetos iluminados. Os LEDs não produzem essa radiação na faixa de luz e funcionamento e podem, por isso, serem vantajosamente utilizados para iluminar obras de arte a curta distância, situação que anteriormente era impeditiva devido aos constrangimentos decorrentes dos efeitos de calor.

Uma evidente vantagem na utilização destes tipos de lâmpadas diz respeito à parte ambiental. Com efeito, a produção de energia elétrica emite CO₂ para a atmosfera, seja por origem térmica. A emissão de CO₂ para a atmosfera é de 24,57 Kg por MWh gerado [13]. A substituição de cinco milhões de pontos de iluminação pública por lâmpadas LED reduziria 26.907,43 toneladas por ano de CO₂ emitido para a atmosfera.

Outra vantagem da tecnologia LED quando comparada a fontes tradicionais de luz é sua eficiência luminosa. Toda pesquisa e desenvolvimento dos LEDs tiveram como alvo a criação de luz mais eficiente que as fontes tradicionais. Ao adquirir uma lâmpada, por exemplo, não se deve comparar a potência mas sim a eficiência luminosa. Para isso é necessário dividir a quantidade de lúmen por Watt (lm/W).

A eficiência do LED é também função de suas características de luz miniaturizada e pontual. A luz dos LEDs é praticamente toda lançada no ambiente, enquanto que num sistema com fluorescentes, por exemplo, há vários tipos de perdas de luz. Existem perdas por refletividade, perdas devido à sombra da própria lâmpada, perdas por absorção do refletor para além de raios que não atingem o refletor. No caso do sistema de LED, não há perda pelo refletor porque a luz é emitida direcionadamente. A luz dos LEDs é mais eficiente quando se considera o sistema total, incluindo perdas de luz.

Há também uma componente muito importante na eficiência dos LEDs, que é justamente o equipamento auxiliar que os faz funcionar, i.e. a fonte de alimentação, frequentemente denominada de *driver*. Para o funcionamento de um LED correcto e com eficiência é necessário instalar as fontes que sejam indicadas pelo fabricante. Uma fonte de qualidade e devidamente especificada produzirá no LED a luz para que foi dimensionada durante o fabrico, pelo que conduzirá à eficiência indicada nas referências técnicas.

⁴ É uma radiação não ionizante na porção invisível do espectro eletromagnético que está adjacente aos comprimentos de onda longos. Pode ser percebida como calor, por terminações nervosas específicas da pele, conhecidas como termorreceptores.

2.4.2 Desvantagens da lâmpada LED

Embora os pontos positivos da tecnologia LED sejam inúmeros, também existem alguns pontos negativos que precisam ser abordados. Sabe-se, por exemplo, que a rede elétrica é vulnerável a alterações no sistema como fenômenos transitórios de alta tensão tais como os resultados de descargas atmosféricas. Visando a proteção das lâmpadas LED é necessário investir em equipamentos de segurança a fim de impedir prejuízos na iluminação. Uma parte dessas proteções, embora de potência reduzida, estão já tipicamente incluídas nos *drivers*. No entanto pode ser justificável incluir externamente um conjunto de proteções adicionais de maior potência.

Por se tratar de uma tecnologia nova no mercado, o custo comparado com outras fontes de iluminação é ainda elevado. A introdução de lâmpadas LED requer cuidados especiais para que seus benefícios sejam alcançados. A obtenção de um resultado de qualidade evidente, requer a utilização de mão-de-obra especializada mas o equilíbrio entre procura/oferta ainda torna o custo deste tipo de actividade relativamente elevado. Há, além disso, uma diferença muito grande na qualidade dos dispositivos. Entre marcas diferentes e com modelos comparáveis pode haver diferenças significativas tanto na luz emitida como no tempo de vida. Como princípio torna-se recomendável selecionar marcas de fabricantes reconhecidos nesta área.

Quando falamos de produtos tradicionais para iluminação é frequente a utilização de equipamentos auxiliares. Por exemplo, para ligar uma luminária *decor* ou outro tipo de halógena de baixa tensão (e.g. 12 V), é necessário um transformador para baixar a tensão da rede da tensão de serviço de 230 V para 12 V. Para ligar uma lâmpada fluorescente utiliza-se um balastro para iniciar o processo e limitar a corrente. No caso do LED não é diferente, isto é, também é necessário utilizar alguns elementos auxiliares tais como o *driver*, o dissipador, a parte óptica [13].

Quanto maior for a potência de uma lâmpada LED maior será calor será gerado e, portanto, maior deverá ser o sistema de dissipação de calor. Quando um módulo utiliza vários LEDs juntos, o problema repete-se de modo aditivo. Tais perdas são transformadas em calor equivalem a cerca de 75% - 85% das totais [13].

A Tabela 5 resume as características das fontes de iluminação abordadas anteriormente.

Tabela 5 - Comparação entre os vários tipos de tecnologias.

Lâmpada	Potência [W]	Temperatura de cor [K]	IRC [%]	Eficiência [lm/W]	Tempo de vida útil [h]
Incandescentes	15 – 1000	2700	100	10 – 20	1000
Halogéneo	20 – 2000	3000	100	25	2000 – 4000
Vapor de mercúrio	50 – 1000	3000 – 5000	40 – 60	20 – 50	16000
CFL integradas	3 – 25	2700 – 4000	85	35 – 70	6000 – 15000
CFL modulares	5 – 55	2700 – 6000	85 – 98	45 – 87	10000
VSAP	50 – 1000	2000 – 3300	20 – 40	70 – 140	16000 – 32000
VSBP	50 – 1000	1800 – 2200	10 – 20	120 – 180	16000
Iodetos metálicos	35 – 3500	3300 – 5500	80 – 90	65 – 110	12000 – 16000
LED	100 – 150	2700 – 4000	85	75	100000
Indução	1 – 8	2700 – 10000	65 – 85	50 – 130	30000 – 100000

2.4.3 Características elétricas do LED

Eletricamente, o LED é semelhante ao um díodo convencional (e.g junção PN), em que se tem que ultrapassar o limiar de tensão que, uma vez excedido, leva ao à condução da corrente eléctrica. Esta necessita de por um dispositivo limitador, e.g. uma resistência externa. A queda de tensão no LED de cor vermelho é normalmente de cerca de 1,6 V, enquanto no LED verde é 2,4 V. Tal significa que teremos que utilizar, em igualdade de situações, uma resistência menor no segundo caso [13].

Outro parâmetro importante do LED é a máxima tensão inversa. Para LEDs vermelhos é da ordem de 3 V e para LEDs verdes é maior, e situa-se entre 5 V a 10 V.

O LED produz luz apenas quando uma corrente DC passa e a quantidade de luz emitida é proporcional a corrente. Isso significa que a intensidade da luz aumenta aproximadamente de maneira linear com o aumento da corrente.

O díodo deve ser ligado ao circuito no sentido correto, caso contrário, ele não acenderá devido a sua baixa taxa de tensão máxima reversa e poderá sofrer dano irreversível se for ultrapassada a máxima tensão inversa. O valor da resistência em série pode ser calculado assumindo uma queda

de tensão de 1,6V sob o LED vermelho. A seguinte expressão pode ser utilizada para calcular o valor da resistência série no circuito DC:

$$R = \frac{V_s - V_f}{I_f}$$

R: valor da resistência série em Ohms

V_s : tensão da fonte CC em Volts

V_f : queda de tensão em avanço no LED

I_f : corrente de operação em avanço desejada em Amperes

Considerando o circuito da Figura 28, teremos:

$$R = \frac{6 - 1,6}{0,02} = 220 \Omega$$

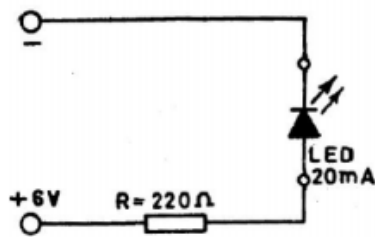



Figura 28 - Exemplo de circuito LED.

A Figura 29 apresenta uma folha de especificação do LED (IR333-A).

			
Technical Data Sheet 5mm Infrared LED , T-1 3/4			
Absolute Maximum Ratings (Ta=25°C)			
Parameter	Symbol	Rating	Units
Continuous Forward Current	I_F	100	mA
Peak Forward Current	I_{FP}	1.0	A
Reverse Voltage	V_R	5	V
Operating Temperature	T_{opr}	-40 ~ +85	°C
Storage Temperature	T_{stg}	-40 ~ +85	°C
Soldering Temperature	T_{sol}	260	°C
Power Dissipation at(or below) 25°C Free Air Temperature	P_d	150	mW

Notes: *1: I_{FP} Conditions--Pulse Width $\leq 100 \mu s$ and Duty $\leq 1\%$.
*2: Soldering time ≤ 5 seconds.

Figura 29 - Folha de especificação de LED [Everlight].

O brilho da iluminação é máximo sob corrente de operação máxima mas o LED fornece luz satisfatória com correntes inferiores. Para equipamentos ligados a bateria, seria melhor operar com 50% da corrente máxima a fim de garantir durabilidade da bateria e do equipamento [32]. A Figura 30 mostra o conceito.

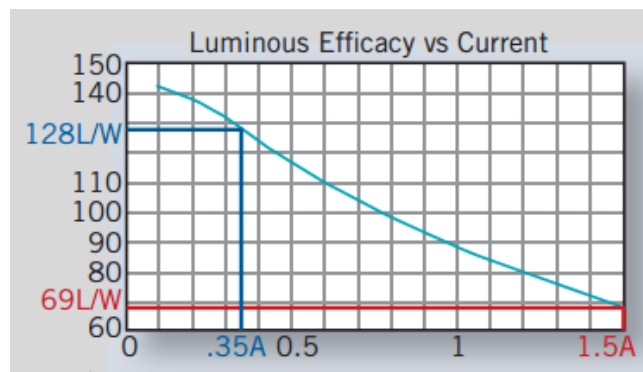


Figura 30 - Eficácia luminosa vs. Corrente forward de LED [32].

Um sistema típico de iluminação baseado em LEDs, conforme mostrada na Figura 31, os estágios principais são os seguintes: uma fonte de alimentação, LED driver, LED ou banco dos LEDs e luminária ou equipamento.

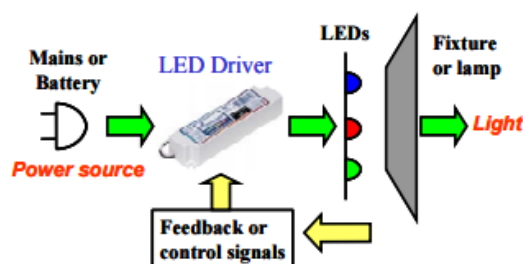


Figura 31 - Sistema de iluminação baseado em LEDs [Philips].

No subcapítulo seguinte serão discutidos alguns conceitos básicos dos LED drivers.

2.5. LED driver

Os LEDs, bem assim como um conjunto de outras lâmpadas, só podem ser à rede elétrica através de um dispositivo apropriado, sendo frequentemente a utilização de um conversor. Estes operam em habitualmente em frequências suficientemente elevada para cair fora do espectro humanamente audível, e são amplamente utilizados em sistemas de iluminação devido às vantagens apresentadas, entre elas, o alto rendimento, redução do volume dos componentes magnéticos [7]. Estes circuitos são frequentemente designados como *drivers*.

Entende-se por LED driver, no âmbito restrito deste trabalho, todo o circuito controlador da alimentação dos LEDs e tem como função efetuar a conversão da energia elétrica da rede em tensão contínua, de forma a alimentar todos os componentes eletrônicos da luminária de LEDs nos seus vários modos de funcionamento. Adicionalmente, alguns *drivers* permitem ainda efetuar o *dimming* nos LEDs, i.e., fazer variar a luminosidade fornecida. Adicionalmente podem ainda possuir meios necessários ao controlo de comunicações ou mesmo implementar capacidades de inteligência artificial.

2.6. Modulação por Largura de Pulso – PWM

A técnica de PWM é empregada em diversas áreas da eletrônica, talvez a mais comum seja a utilização em fontes chaveadas mas também pode ser utilizada para controle de velocidade de motores, controle de luminosidade (*dimming*), controle de servo motores e diversas outras aplicações. PWM significa *Pulse Width Modulation* ou Modulação de Largura de Pulso, ou seja, através da largura do pulso de uma onda quadrada é possível o controle de potência ou velocidade.

A técnica do PWM, consiste em alterar o *duty cycle* da tensão de saída através da comparação do sinal de referência gerado pelo sistema de controlo, também chamado onda moduladora, com uma onda triangular de elevada frequência, designada por onda portadora. Assim, a tensão de saída é formada por sucessivas ondas rectangulares que são filtradas para dar origem à onda fundamental desejada. A Figura 32 ilustra este conceito.

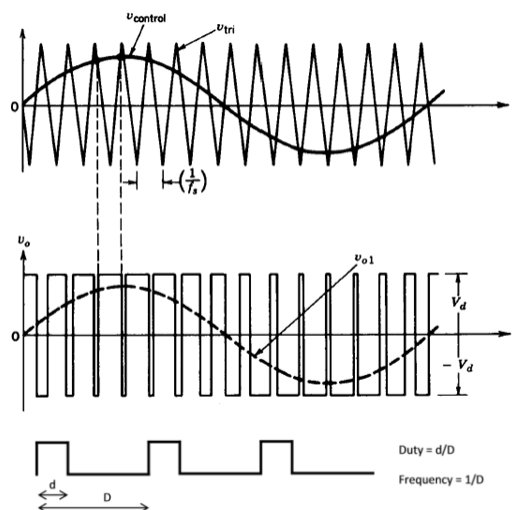


Figura 32 - Funcionamento do PWM [58].

O sinal de referência é responsável por controlar a amplitude e a frequência dessa onda. Quanto maior for o seu valor maior é o *duty cycle* da onda rectangular. Quando controlamos o tempo que a chave fica ligada e conseqüentemente o tempo dela desligada podemos controlar a potência média entregue a carga.

PWM + LED

Uma das principais vantagens deste método é a possibilidade de ter uma frequência de comutação fixa, sendo esta estabelecida pela frequência da portadora. No entanto, uma das desvantagem deste método é o facto que a relação entre o fluxo luminoso e a corrente é linear, verifica-se a Figura 33:

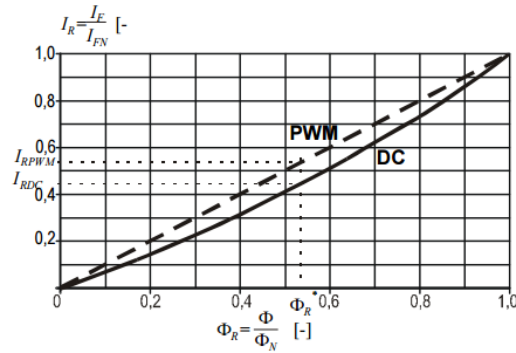


Figura 33 - A comparação entre a corrente contínua e corrente pulsada ao mesmo fluxo luminoso Φ_R [57].

Em suma: pode se observar as diferenças entre destas tecnologias a partir da Tabela 6:

Tabela 6 - As diferenças entre *drivers* de corrente contínua e de corrente pulsada.

	Corrente contínua	Corrente pulsada
Relação entre fluxo luminoso e corrente de LED	Não linear $\Phi = \sqrt{2} \times \ln(1 + I_R)$	Linear (depende principalmente de frequência) $\Phi = f(I_F)$
Poupança de energia	Na ordem 17% (para níveis extremamente baixos)	Na ordem 30% a 40% (para níveis altos)
As perdas	Perdas dos semicondutores – zona activa $\Delta E = I_F \times (U_{sub} - U_F)$	Perdas dos semicondutores ΔE_P + perdas das comutações ΔE_K $\Delta E_P = I_{FN} \times \Delta U_{TR} \times D$ $\Delta E_K = f_{PWM} \times (\Delta E_{ON-OFF} + \Delta E_{ON-OFF})$
Qualidade	Luminosidade contínua (como natural)	Pulsos fortes (ainda não sabendo o impacto à visão do humano e ambiente)

Φ – luminous flux; Φ_R – relative luminous flux; I_F – forward current; U_F – forward voltage;

I_R – relative forward current; I_{FN} – switched-on transistor current; ΔU_{TR} – transistor voltage drop;

U_{SUP} – supply voltage.

PERDAS DE COMUTAÇÃO EM SEMICONDUTORES DE POTÊNCIA

As perdas de comutação têm lugar nos semicondutores de potência aquando da sua comutação de OFF para ON e vice-versa. O conceito encontra-se descrito na Figura 34. Quando o interruptor se encontra no estado OFF, o interruptor apresenta a tensão máxima aos seus terminais, sendo atravessado apenas pela corrente de fugas. Aquando da passagem de OFF para ON, a tensão aos terminais do interruptor desce até se estabelecer a tensão de condução. Ao mesmo tempo que a corrente sobe até assumir o seu valor final. Podemos distinguir três situações ao nível da potência envolvida. Quando se tem a situação de interruptor aberto, tem-se tensão nominal e corrente nula, resultando o seu produto num valor próximo de zero. Quando se tem a situação de interruptor fechado tem-se corrente nominal e uma tensão de condução relativamente pequena, conduzindo a uma potência de perdas relativamente baixa. No entanto durante a transição de estado coexistem simultaneamente valores importantes de tensão e correntes, levando a que a potência de perdas seja muito significativa. Durante a transição de ON para OFF dá-se o processo inverso.

Conforme se pode verificar, a potência de perdas deve-se quase totalmente às de comutação. Estas são, deste modo, proporcionais à frequência de trabalho.

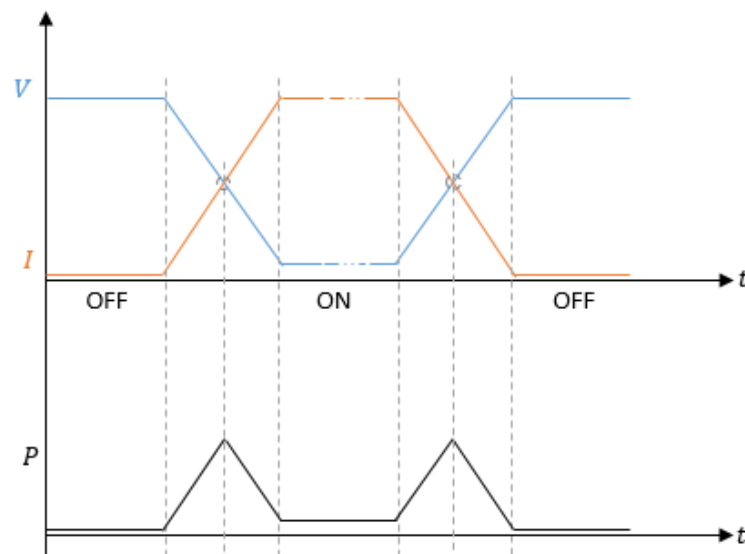


Figura 34 - Perdas de comutação.

2.7. As harmónicas na rede eléctrica

Este subcapítulo apresenta vários tópicos sobre as harmónicas de modo a obter-se uma melhor percepção sobre o funcionamento das cargas não lineares e dos LEDs em particular. Assim, começa-se por explicar o que são as harmónicas e como é que estas se formam. Depois analisam-se os principais indicadores sobre a quantidade de harmónicas existentes. Por último são dados vários

exemplos de cargas que provocam elevado conteúdo harmónico e aquelas que são particularmente afectadas por eles.

2.7.1 Definição de harmónicas

Uma onda periódica, seja qual for a sua forma, pode sempre ser composta pela soma de várias sinusoides. Essa soma é, normalmente, conhecida por série de Fourier. A fundamental, é a componente sinusoidal, cuja frequência é igual à da onda. As harmónicas são os componentes não sinusoidais (distorcidos) repetitivos do componente fundamental com frequências múltiplas da fundamental. Por exemplo, numa onda de 50Hz, um harmónico de 5ª ordem tem uma frequência de 5 vezes a frequência fundamental, ou seja, 250Hz. As Figuras 35 e 36 mostram-se o conceito [16].

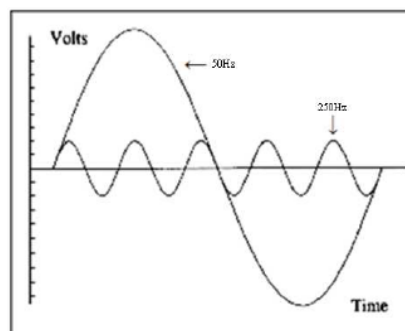


Figura 35 - Onda fundamental e 5º harmónico [16].

Somando as duas sinusoides (fundamental mais o 5º harmónico) obtém-se uma onda com a mesma frequência da fundamental mas com uma forma de onda distorcida.

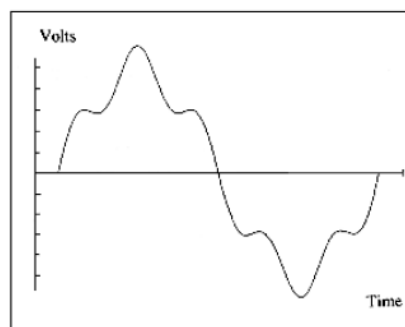


Figura 36 - Soma da fundamental com o 5º harmónico [16].

Nos sistemas eléctricos, idealmente, só deve existir a componente fundamental, no entanto, devido às cargas não lineares, isso não acontece. Tanto as correntes como as tensões apresentam, nos dias de hoje, distorções bastante significativas nas suas formas de onda devido às componentes harmónicas. Essas harmónicas podem ser separados em vários tipos, tendo comportamentos diferentes. Existem as harmónicas pares, as ímpares e as interharmónicas:

- As harmónicas pares, de uma forma geral, têm um valor muito reduzido devido à simetria de meia onda apresentada pelas correntes e tensões dos sistemas eléctricos. Desta forma, tornam-se menos problemáticos do que as outras harmónicas. No entanto, é possível que em alguns casos eles surjam, estando associados a componentes contínuas da onda podendo saturar os transformadores [17].
- As harmónicas ímpares são aqueles que têm, normalmente, maior amplitude. Por isso, causam maior influência nas cargas [18].
- As interharmónicas, ao contrário dos anteriores, não se relacionam com a componente fundamental. Eles surgem quando há componentes de corrente que não se relacionam com a frequência fundamental. São, normalmente, provocados por conversores estáticos de potência, ciclo conversores, motores de indução e fornos a arco. Os seus efeitos são *flickers* visuais em *displays* de alguns aparelhos e na iluminação [16, 19].

2.7.2 Como se formam as harmónicas

Num sistema eléctrico ideal, onde só operam cargas lineares, tanto a forma de onda da tensão como da corrente são sinusoidais. Isto porque, uma carga linear quando é alimentada por uma tensão sinusoidal consome uma corrente também sinusoidal, mesmo que as duas não estejam em fase. A Figura 37 apresenta-se o conceito.

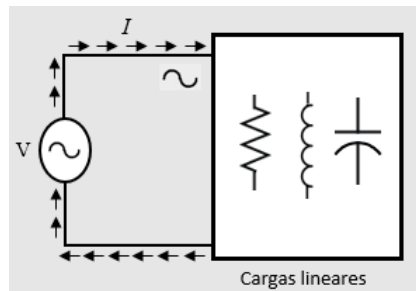


Figura 37 - Tensão e corrente nas cargas lineares.

O mesmo não se sucede quando se trata de uma carga não linear. Estas cargas consomem correntes com formas de onda diferentes da forma de onda da tensão, não havendo uma relação proporcional entre elas, dando assim origem às harmónicas, conforme se representa na Figura 38.

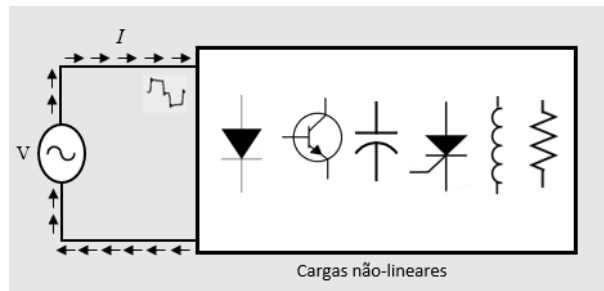


Figura 38 - Tensão e corrente nas cargas não-lineares.

Entretanto, todos equipamentos que estão utilizados são cargas não-lineares, tais como, PC, luminária com balastro eletrônico, motor de velocidade variável. Por outras palavras, equipamentos que normalmente contém uma fonte de alimentação comutada que tem um circuito de entrada de rectificação. Este tipo de circuito converte a tensão AC para DC carregando um grande capacitor. O equipamento gera corrente DC através deste circuito de forma a alimentar a carga não-linear. A Figura 39 mostra-se o conceito.

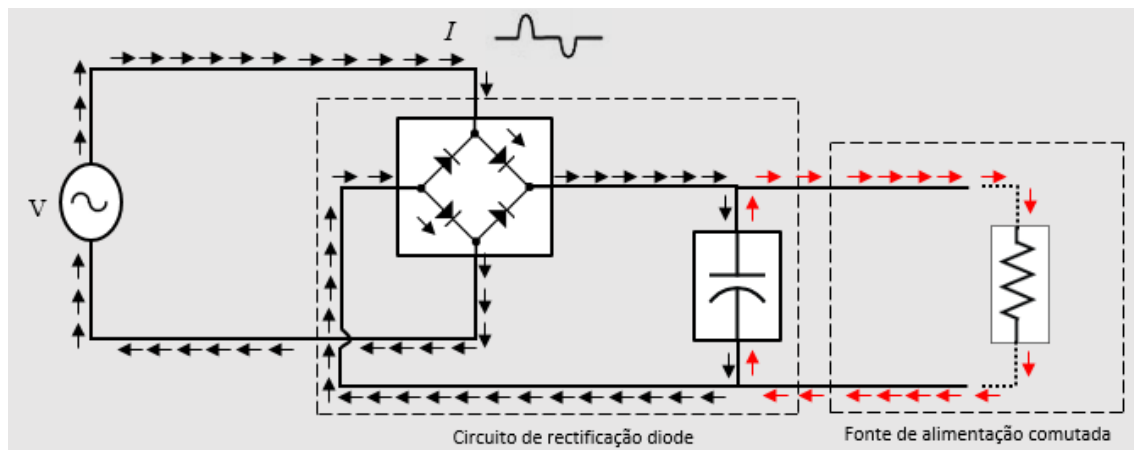


Figura 39 - Circuito do rectificador diode-capacitor.

A carga não-linear pode ser representada por uma resistência em paralelo com vários geradores de correntes com harmónicas. Como se mostra na Figura 40.

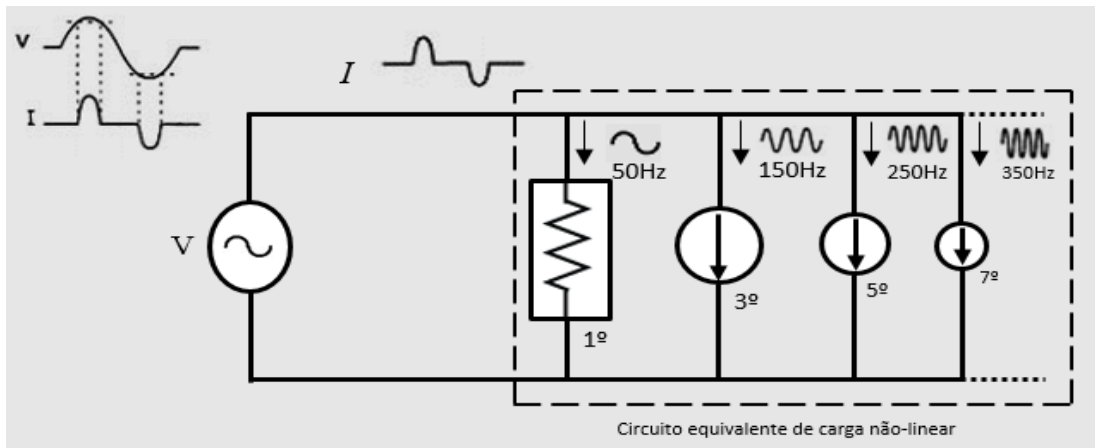


Figura 40 - Circuito elétrico equivalente.

A distorção na forma de onda da tensão deve-se às harmónicas da corrente. Cada harmónica associada a uma corrente, causa uma harmónica de ordem igual na tensão. Isto acontece devido às impedâncias das linhas. Observando a Figura 41, que mostra uma carga não linear ligada à rede eléctrica, é possível observar que, a corrente que percorre o circuito (i_L), causa quedas de tensão nas impedâncias das linhas (Δv). Se a corrente for sinusoidal a queda de tensão também será sinusoidal, no entanto, no caso de uma corrente distorcida, cada harmónica causa uma queda de tensão nas impedâncias, fazendo com que a tensão aos terminais da carga (v_L) fique distorcida. A amplitude da distorção na tensão depende da corrente consumida pela carga e da impedância da linha [18].

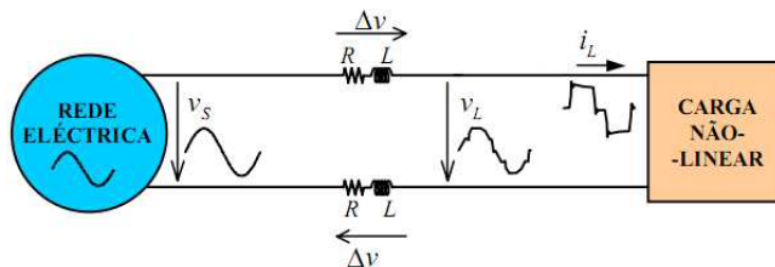


Figura 41 - Efeito das harmónicas na linha eléctrica [59].

2.7.3 Efeitos das harmónicas em cargas eléctricas

As harmónicas, tanto de corrente como de tensão, afectam as cargas. Dependendo da sua susceptibilidade, as cargas podem tolerar, melhor ou pior, a presença das harmónicas. As cargas resistivas, normalmente, são aquelas menos afectadas, uma vez que, a forma de onda é pouco relevante. Os equipamentos mais susceptíveis são aqueles que assumem uma alimentação sinusoidal a uma determinada frequência e que podem alterar o seu funcionamento (ou deixar de funcionar) devido à presença de harmónicas. De qualquer forma, mesmo as cargas menos sensíveis são

afectadas pelas harmónicas, estando os componentes e isolamentos sempre sujeitos a um esforço extra que leva a uma diminuição da sua vida útil.

Os efeitos negativos da ocorrência das harmónicas podem ser integrados em duas categorias:

- Efeitos instantâneos
- Efeitos de longa duração

Encontram-se a seguir descritos mais detalhadamente, os efeitos mais comuns das harmónicas em algumas cargas utilizadas [60].

1. Cabos de alimentação:

Devido ao efeito pelicular, as harmónicas de corrente, principalmente os de ordem mais elevada, provocam um aumento das perdas nos condutores. Pode existir também o efeito de proximidade que relaciona o aumento da resistência de um condutor com os campos magnéticos produzidos pelos condutores colocados nas imediações. No caso de os cabos serem longos e os sistemas ligados a eles tiverem as ressonâncias excitadas pelas harmónicas, podem aparecer sobretensões nas linhas provocando danos nos cabos.

Em resumo, quando existem harmónicas de corrente nos cabos de alimentação, existe um claro aumento das perdas, levando a um prejudicial sobreaquecimento. Esse aumento da temperatura dos cabos pode levar a um maior desgaste do isolamento, diminuindo o seu tempo de vida útil. Por este motivo, deve evitar-se, dentro do possível, a propagação das harmónicas.

2. Transformadores:

À semelhança do que acontece noutros componentes, as harmónicas causam o aumento das perdas dos transformadores. As harmónicas de tensão provocam o aumento as perdas no ferro, enquanto as harmónicas de corrente provocam o aumento Inversor de Tensão Controlado por Corrente com Frequência de Comutação Fixa das perdas no cobre devido ao efeito pelicular e ao aumento do valor eficaz da corrente, tal como acontece nos cabos condutores.

Outro dos problemas das harmónicas nos transformadores é a possibilidade de ocorrerem fenómenos de ressonância, podendo surgir componentes de alta frequência e amplitude elevada.

Os valores das reactâncias de dispersão aumentam com a frequência o que leva a um aumento das quedas de tensão no transformador.

Existem ainda as correntes de magnetização que são uma parte significativa das perdas dos transformadores e crescem proporcionalmente com o quadrado da frequência e da corrente.

Em consequência destes factores, os transformadores sofrem vários problemas, como sobreaquecimentos, efeitos de saturação, vibrações nos enrolamentos e o desgaste do isolamento entre as lâminas do circuito magnético.

3. Motores:

Nos motores de corrente alternada (motor de indução e máquina síncrona), as harmónicas provocam um maior aquecimento devido ao aumento das perdas, tanto no ferro como no cobre. Esse factor leva a uma diminuição da eficiência do motor e do seu binário disponível. Por outro lado, as harmónicas de tensão induzem harmónicas de corrente nos rotores, sendo estes, responsáveis pelos binários pulsantes que provocam vibrações nos motores, levando-os a emitir ruídos sonoros. Isso acontece porque, existem harmónicas de sequência negativa que produzem um campo girante contrário ao campo girante produzido pela fundamental, como é o caso das harmónicas de ordem 5, 11, 17, etc. Por exemplo, as harmónicas de 5ª ordem em conjunto com os de 7ª, produzem no rotor, um binário equivalente a um harmónico de 6ª ordem, pois o motor roda aproximadamente sincronizado com a fundamental.

É importante referir que os efeitos provocados pelas harmónicas não se manifestam com a mesma intensidade em todos os motores. Os aspectos da construção e constituição dos motores são relevantes e alteram a forma como são afectados.

4. Condensadores

Uma das possíveis consequências, causadas pelas harmónicas, em relação aos condensadores, é a ocorrência de ressonâncias que poderão produzir excessos de corrente e de tensão.

Outro problema é que a reactância capacitiva diminui com o aumento da frequência. Esse facto faz com que as correntes de frequências elevadas circulem com maior facilidade através dos condensadores, provocando o aumento das perdas e o consequente aquecimento e diminuição do tempo de vida útil do condensador, levando também a um eventual risco de explosão.

5. Iluminação:

Redução da vida útil das lâmpadas incandescentes uma vez que são sensíveis à sobretensão aplicada. Estudos referem que uma sobretensão, devidas harmónicas, de valor eficaz 5% continuamente aplicada reduz o tempo médio de vida das lâmpadas de 47%. Relativamente às

lâmpadas de descarga referem-se o ruído audível e possíveis ressonâncias envolvendo as lâmpadas, balastros e condensadores usados na rectificação do factor de potência. Tais como as lâmpadas de LED que, recentemente estão a utilizar no sistema da IP. O objectivo deste trabalho avaliar os efeitos das harmónicas em LED para posteriormente implementar um conjunto de medidas que otimizem a sua eficiência.

6. Equipamentos eléctricos em geral:

Existem muitos equipamentos sensíveis à presença de harmónicas de tensão. Um exemplo disso é o caso dos aparelhos que utilizam a detecção de passagem por zero da tensão, ou outro aspecto da onda, para desempenhar uma tarefa. Com as distorções na forma de onda da tensão, isso pode-se tornar inviável.

Outro exemplo, que se pode demonstrar, é o caso em que as harmónicas penetram na alimentação de um equipamento por meio de acoplamentos indutivos e capacitivos. Com o aumento da frequência alteram-se as reactâncias, podendo ser alterado o funcionamento desses equipamentos.

7. Relés de protecção, disjuntores e fusíveis:

A corrente eficaz que passa nos dispositivos aumenta com a presença das harmónicas, provocando nestes, um maior aquecimento. Isso levará a uma diminuição do seu tempo de vida útil e poderá também fazer com que possam actuar, em alguns casos, de forma inadequada. No caso dos relés de protecção, as distorções nas formas de onda, podem dar origem a que operem indevidamente ou até impedir que entrem em funcionamento. Em relação aos disjuntores e fusíveis, as harmónicas podem alterar as suas capacidades de interrupção.

8. Sistemas informáticos:

Nos sistemas informáticos, a presença de harmónicas pode provocar o aumento de erros na transmissão de dados, reduzindo a velocidade de comunicação. Na indústria, podem ser afectados os sinais de processos levando a medições erradas e perturbando os sistemas de controlo dos processos.

No caso dos aparelhos que usam a rede como sinal de sincronismo, as harmónicas de tensão podem, naturalmente, provocar falhas de sincronismo que por vezes originam o *reset* do sistema.

9. Aparelhos de medida:

Os aparelhos de medida podem ser afectados pelas harmónicas no caso, por exemplo, de haver ressonâncias que afectem as medições. Outro aspecto a ter em conta é o facto de as harmónicas de corrente contribuírem para um aumento do valor eficaz. Desse modo a potência aparente será mais elevada, facto que pode não se traduzir numa maior potência activa. Assim para se conhecer o verdadeiro factor de potência é necessário ter em conta a distorção da corrente.

Para minimizar o efeito da distorção harmónica em cargas mais sensíveis são adoptados circuitos de alimentação diferentes para as cargas lineares e para as cargas não lineares. A utilização de filtros de harmónicas tem como objectivo reduzir a amplitude de tensões e correntes de uma ou mais frequências harmónicas.

2.7.4 Os indicadores essenciais do conteúdo harmónico

Existem indicadores que permitem quantificar e avaliar a distorção harmónica das ondas de tensão e de corrente. Estes são os seguintes:

- i. A análise espectral da onda;
- ii. O factor de crista;
- iii. A taxa de distorção harmónica;
- iv. O factor de potência;
- v. O factor K e K-factor.

Estes indicadores são indispensáveis para determinação das ações corretivas eventuais.

- i. Análise espectral da onda

Para se conhecer a composição do conteúdo harmónico das ondas, recorre-se geralmente, à análise do seu espectro. O espectro harmónico da onda mostra a amplitude e a frequência de cada componente presente nela em forma de histograma, permitindo ter uma rápida percepção do conteúdo harmónico presente [18]. A Figura 42 ilustra um exemplo do espectro de uma onda com elevado conteúdo harmónico.

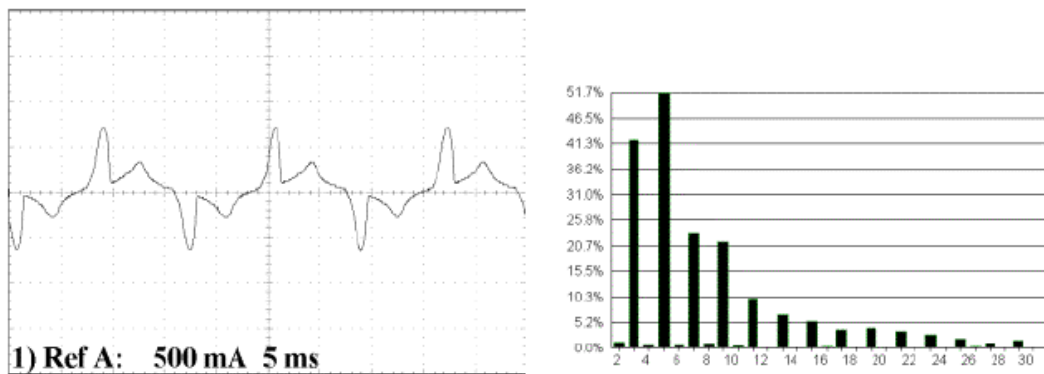


Figura 42 – Uma onda de corrente e respectivo espectro harmónico [18].

Neste exemplo, as várias componentes harmónicas estão representadas no histograma em forma de percentagem em relação à fundamental, no entanto, em alguns casos a representação é feita através dos seus valores eficazes.

ii. Factor de Crista

O Factor de Crista (FC) é a razão entre o valor de crista da corrente ou da tensão (Ipico ou Vpico) e o valor eficaz. Para um sinal senoidal, este factor é então igual a $\sqrt{2}$.

$$FC = \frac{I_{pico}}{I} \text{ ou } \frac{V_{pico}}{V}$$

Para um sinal não senoidal, pode ser que seja inferior, seja superior a $\sqrt{2}$. Este factor é mais particularmente útil para atrair a atenção sobre a presença de valores de crista excepcionais em relação ao valor eficaz. O valor de crista nos equipamentos eletrónicos tem relação direta com o disparo de díodos e outros componentes. Os valores típicos estão entre 1,5 e 2 mas, por vezes podem atingir valores os 5 em alguns casos específicos o que se pode tornar bastante inconveniente. A Figura 43 ilustra formas de ondas do componente fundamental (sinal 1) e da quinta harmónica (sinal 5) de um diode.

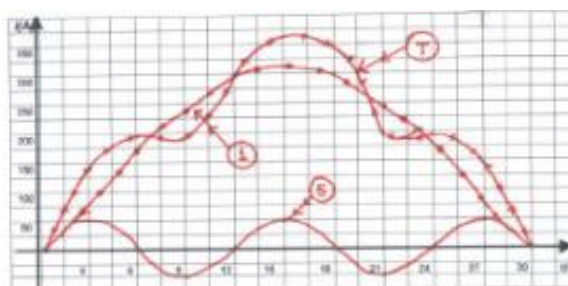


Figura 43 - A distorção harmónica causada pelo diode.

Somente com o sinal 1, o disparo do diodo ocorreria em um tempo igual a 15 e com o sinal total T (com harmônicas), o disparo ocorreria em um tempo igual a 13 (antes). Os dados obtidos são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Os valores do Factor de Crista obtidas pela Figura 41.

Sinal	Ip (A)	I _{ef} (A)	FC	Obs.
1	310	219.2	1.41	Sinusoidal
5	50	35.4	1.41	Sinusoidal
T	360	222	1.62	distorcida

Um factor de crista muito elevado significa sobrecargas pontuais consideráveis. Estas sobrecargas, detectadas pelos dispositivos de proteções, podem ser a origem dos disparos intempestivos.

iii. Taxa de Distorção Harmónica THD

A THD descreve a relação entre o conteúdo harmónico da onda e a sua componente fundamental. Normalmente, a THD é expressa em termos percentuais e é um método simples e prático que constitui um dos principais parâmetros de medição do conteúdo harmónico. O cálculo para a determinação da THD é independente da natureza da onda, podendo-se aplicar da mesma forma tanto para as tensões como para as correntes. Considerando h uma onda periódica com harmónicas múltiplos da fundamental e H o valor eficaz dessa onda, pode-se calcular a THD através da expressão:

$$THD\% = \frac{\sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots + H_n^2}}{H_1} \times 100$$

Na expressão, o termo H_1 corresponde ao valor eficaz da componente fundamental e os restantes correspondem às diversas harmónicas representadas [19].

Para este manual, define-se THDi como a distorção harmónica da corrente absorvida por uma carga não linear, em geral equipamentos eletroeletrônicos, em relação à onda senoidal pura com frequência de 60Hz, fornecida pela concessionária. Com relativa intensidade, uma corrente com elevado THDi pode provocar distorções nas formas de onda da corrente e tensão do sistema elétrico, reduzindo a qualidade da energia entregue e prejudicando o funcionamento de outros equipamentos conectados à mesma rede.

$$THDi \% = \frac{\sqrt{\sum_{j=2}^n I_j^2}}{I_1} \times 100$$

Em que:

I_j é o valor eficaz da componente harmónica da corrente absorvida pela carga.

I_1 é a componente fundamental da corrente, com frequência de 60Hz.

THDi (%) é a taxa de distorção harmónica da corrente expressa em valores percentuais

iv. Factor de Potência FP

Em síntese, e em termos qualitativos, o FP é um índice adimensional que indica a representatividade da energia ativa perante a energia total (aparente) absorvida por um equipamento (ou uma instalação). Varia entre 0 e 1 indutivo ou capacitivo, ou seja, entre zero e 100%.

Pode ser definido recorrendo-se ao conhecido “triângulo de potências” apresentado na Figura 44 e expresso da seguinte forma para sistemas puramente senoidais [17]:

$$FP = \frac{kW}{kVA} = \frac{P}{S} = \cos \varphi = \cos \left(\tan^{-1} \frac{kVAr}{kW} \right)$$

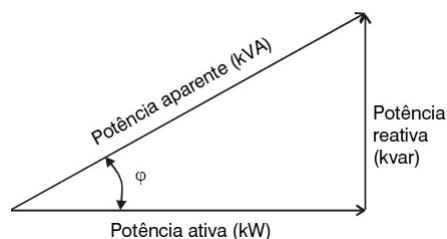


Figura 44 - O triângulo das três principais potências.

Onde:

P – potência ativa, expressa em kW;

Q – potência reativa, expressa em kVAr;

S – potência aparente, expressa em kVA;

φ – ângulo de defasagem entre tensão e corrente (graus elétricos), conforme Figura 45.

É o não alinhamento da tensão e corrente devido a distorção das formas de Onda: na língua inglesa Distortion Power Factor (DF):

$$DF = \frac{I_1}{I_{rms}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

Ambos são importantes e igualmente afetam o factor de potência total.

Um FP indutivo significa que a instalação eléctrica está absorvendo a energia reactiva. Um factor de potência capacitivo significa que a instalação eléctrica está fornecendo a energia reactiva. Como pode-se observar na Figura 45, a forma de onda de corrente atrasada em relação à onda de tensão, logo a carga possui característica indutiva. $FP < 1$ (atrasado). φ representa a defasagem entre elas.

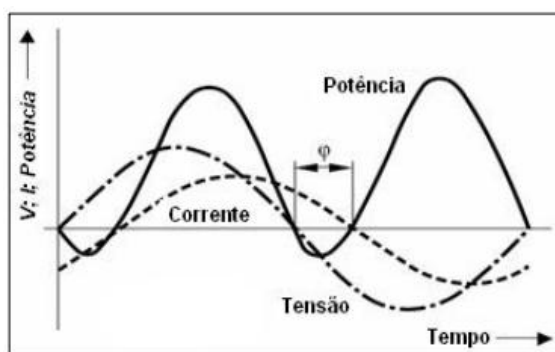


Figura 45 - Ângulo de defasagem entre corrente e tensão [SIEMENS, 2005].

Na prática, O FP mostra o grau de eficiência do uso de sistemas eléctricos. Quando o factor de potência é igual a 1, toda a energia fornecida é consumida, visto que apenas a potência ativa realiza trabalho efetivamente. Para valores altos, muito próximos de 1, indica-nos que está a ser utilizada pouca energia reactiva em relação à activa, ou seja, revela um uso racional de energia eléctrica. Para valores próximos ou abaixo de 0,92 indica-nos que há excesso de energia reactiva, necessária para o funcionamento de elementos armazenadores de energia, como indutores e capacitores, mas que deve ser compensada, pois gera perdas e diversas perturbações no sistema eléctrico. Perdas estas que são maiores quanto maior for a distancia entre a fonte e as cargas, e quanto maior for a impedância das linhas, e quanto menor for o valor do factor de potência [8].

Certas cargas como, por exemplo, as lâmpadas incandescentes ou os fornos resistivos, conseguem transformar toda a energia consumida em outras formas de energia (energia luminosa e térmica no caso das lâmpadas incandescentes, e, basicamente, energia térmica no caso dos fornos resistivos – calor por convecção e por radiação). Outras, tais como os motores de indução, utilizam parte da energia consumida para sua operação própria (manutenção de seus campos magnéticos internos) e parte para a transformando em trabalho útil e para o suprimento de suas perdas internas.

No entanto, há situações no sistema eléctrico em que as tensões e correntes não são senoidais puras. Para estes casos a equação geral para o cálculo do factor de potência deve ser utilizada. Para o cálculo do factor de potência dos equipamentos abrangidos por este manual, deve-se utilizar a equação apresentada na sequência, que é resultado da inserção do conceito da THDi apresentada anteriormente no (iii) na equação geral, desprezando as possíveis distorções na forma de onda da tensão. Observa-se que, caso a corrente absorvida pela carga seja senoidal pura, o valor de THDi

será nulo, e o resultado da equação será apenas o cosseno do ângulo de defasamento entre a tensão e a corrente.

$$FP = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + THDi^2}}$$

Verifica-se quando $\varphi = 0$, o factor de potência diminui com o aumento da $THDi$. Na Figura 46 é possível observar graficamente da variação do $\frac{FP}{\cos \varphi}$ em função da $THDi$.

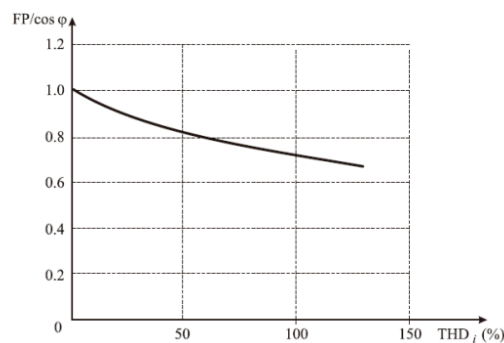


Figura 46 - Variação do FP em função da THDi [SIEMENS, 2005].

v. Factor-K

Nos transformadores, pode-se aplicar um factor de desclassificação K, conforme o conteúdo harmónico das cargas a ligar aos mesmos, ou instalar transformadores com Factor-K já definido pelo fabricante para o tipo de cargas que se vai alimentar.

Segundo o *Manual da Qualidade da Energia Eléctrica da EDP* e o *guia Harmonics, Transformers and K-Factors of Copper Development Association*, o método usado na Europa consiste em calcular o quanto tem de ser reduzida a potência de um transformador comum, a fim das suas perdas totais com cargas harmónicas não excederem as perdas à componente fundamental para a qual este foi projectado. O factor-K é definido da seguinte forma⁵:

⁵ Nos Estados Unidos os fabricantes de transformadores em conjunto com a Underwriters Laboratories, desenvolveram uma abordagem conhecida como K-Factor, que consiste em calcular o aumento das perdas que o transformador vai ter com cargas harmónicas. Esta abordagem permite escolher um transformador projectado para lidar com essas perdas. $K = \sum_{h=2}^{h_{max}} h^2 \times \left(\frac{I_h}{I}\right)^2$. Obtido o valor de K escolhe-se um transformador com o valor aproximado ao valor padrão imediatamente acima. Os valores padrão são: 1; 4; 9; 13; 20; 30; 40 ou 50

$$K = \sqrt{1 + \frac{e}{1+e} \times \left(\frac{I_1}{I}\right)^2 \times \sum_{h=2}^{hmax} \left(h^q \times \left(\frac{I_h}{I}\right)^2\right)}$$

Sendo:

e - Relação entre as perdas na frequência fundamental e as perdas que se produzem por uma corrente continua de igual valor eficaz.

I - Valor eficaz da corrente, incluindo harmónicas.

I₁ - Valor da componente fundamental da corrente.

I_h - Valor da componente de ordem h da corrente.

h - Ordem do harmónico.

hmax - Ordem do harmónico máximo a considerar.

q- Constante que depende do tipo de enrolamentos e da frequência. Os valores típicos são:

1,7 Transformadores com condutores redondos ou rectangulares

1,5 Transformadores com enrolamentos de secção plana

2.8. O interesse da Compensação do FP

Em redes de distribuição, os clientes fornecidos em MT e BTE têm interesse em possuir a sua instalação de utilização de energia eléctrica equipada com compensação de factor de potência, devido aos seus inconvenientes na sua instalação já enunciados anteriormente e porque esta pode representar um custo acrescido na sua fatura mensal de energia eléctrica. Assim, o cliente tem toda a vantagem de possuir uma maior energia ativa disponível para alimentar a sua instalação, com o mesmo transformador, aumentando ainda o tempo de vida útil do equipamento. Pois assumindo valores muito baixos do FP, pode causar os seguintes problemas na rede eléctrica [Galp energia]:

- a) Aumento na corrente que flui através do neutro, causando sobreaquecimento nos condutores.
- b) Distorção na tensão de alimentação do sistema, afetando o funcionamento de outros equipamentos conectados a rede.
- c) Redução da capacidade de fornecimento da energia ativa, pois a energia reativa solicitada por cargas com baixo factor de potência também demanda ocupação dos condutores (A Figura 47 mostra o conceito).

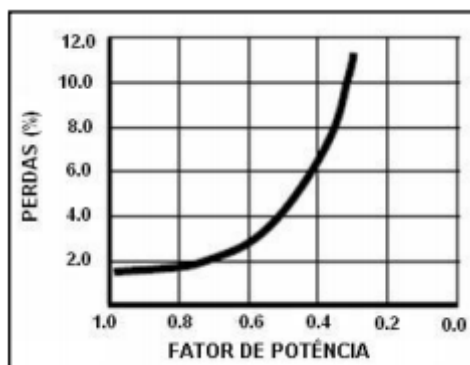


Figura 47 - Variação das perdas de energia em condutores em função do FP [CODI, 2004].

- d) Aumento das perdas nos transformadores. Além do aumento da corrente que flui através do neutro, outra fonte de perda, ocasionada por cargas com baixo factor de potência, é a elevação das correntes de fuga.
- e) Com característica capacitiva, um baixo factor de potência pode ocasionar sobretensões.

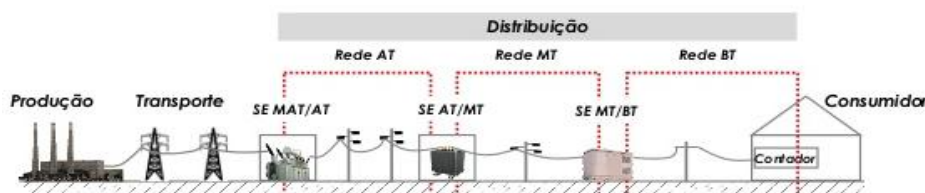
Inconvenientes da energia reativa:

A energia activa é a energia que produz trabalho, como por exemplo: a rotação do eixo de um motor, ao contrário da energia reactiva que é a energia que não produz trabalho, mas é necessária para produzir o fluxo magnético indispensável ao funcionamento dos motores, transformadores, etc..

A utilização de energia reactiva, por não realizar trabalho efectivo, deve ser limitada ao mínimo possível. Todo excesso de energia reactiva é prejudicial ao sistema eléctrico, seja reactiva indutiva, consumida na instalação de cliente ou reactiva capacitiva, fornecida à rede. Energia reactiva a mais implica ter menos energia activa disponível nas redes, para além de aumentar as perdas na distribuição e nas instalações de cliente [22].

Tabela 8 - Impacto de inconvenientes da energia reativa à rede elétrica.

<i>Inconvenientes para o produtor</i>	<i>Inconvenientes para o transportador e distribuidor de energia</i>	<i>Inconvenientes para o consumidor</i>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Instalação de alternadores de maior potência, mais caros; ▪ Diminuição do rendimento e aumento das perdas dos alternadores; ▪ Instalação de Transformadores e aparelhagem de proteção, comando e manobra mais caros. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Secção dos condutores das linhas e cabos mais elevada, tornando as instalações mais caras; ▪ Postes e isoladores de apoio das linhas aéreas com maiores dimensões, logo mais caros; ▪ Transformadores de maior potência, logo mais caros; ▪ Aparelhagem de proteção, comando e manobra mais cara; ▪ Quedas de tensão e perdas por efeitos de Joule nas linhas e cabos. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Secções dos condutores mais elevados; ▪ Quedas de tensão e perdas mais elevadas; ▪ Calibres superiores das aparelhagens de Proteção, Comando e Manobra; ▪ Transformadores de maior potência, se estes existirem.



A forma de avaliar se energia reactiva está a ser ou não utilizada racionalmente faz-se através do factor de potência que define a relação entre as energias reactiva e activa, medidas no mesmo período.

Compensação do Factor de Potência

A compensação do FP é a forma de limitar ou evitar a absorção, pelos centros de produção, de energia reativa da rede. A compensação do factor de potência consiste em, localmente, na própria instalação do cliente, produzir a energia reativa necessária ao funcionamento da mesma com um factor de potência aceitável. Em vez do termo compensação, também são utilizadas as designações “correção” ou “melhoria”.

A solução dos problemas passa pela correcção do factor de potência através de por exemplo baterias de condensadores capazes de armazenar a energia reactiva e fornecer aos equipamentos essa energia necessária ao seu funcionamento. A correcção deve fazer-se automaticamente em

todos os períodos horários para evitar efeitos adversos e preferencialmente junto dos equipamentos, de modo a que a circulação da energia reactiva fique limitada aos pontos onde ela é efectivamente necessária, reduzindo perdas, melhorando condições operacionais e libertando capacidade em transformadores e condutores para atendimento a novas cargas, tanto nas instalações consumidoras como nos sistemas eléctricos do distribuidor.

As vantagens de correcção da energia reactiva são as seguintes [22]:

- ✓ Diminuição das variações de tensão;
- ✓ Diminuição do aquecimento de condutores;
- ✓ Redução das perdas de energia na rede e nas instalações particulares;
- ✓ Melhor aproveitamento da capacidade dos transformadores;
- ✓ Aumento da vida útil dos equipamentos;
- ✓ Utilização racional da energia consumida;
- ✓ Desaparecimento do consumo de energia reactiva excedente, que é cobrado na factura de energia.

2.9. Considerações gerais sobre as possibilidades de correcção do FP

Basicamente, e em tese, há vários métodos passíveis de utilização para a correcção do FP:

- Aumento do consumo de energia ativa;
- Utilização de motores síncronos superexcitados;
- Utilização de capacitores (ilustra na Figura 48);
- Utilização de filtros.

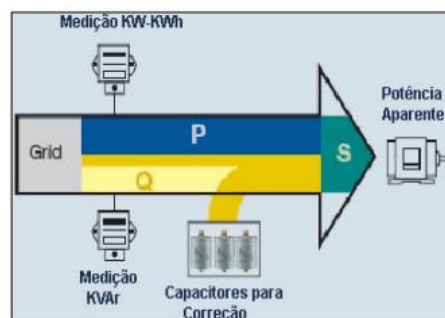


Figura 48 - Correcção do FP por capacitores [EPCOS].

2.10. Cargas não-lineares

A utilização de cargas não-lineares em detrimento das cargas lineares permite maior rendimento e maior controlo sobre os processos particulares de cada equipamento. No entanto, estas cargas

apresentam também desvantagens que não são tão conhecidas e divulgadas. As cargas lineares caracterizam-se pelo facto de a sua utilização com uma determinada forma de onda de tensão resultar numa forma de onda de corrente equivalente como ilustrado na Figura 49. Assim, este tipo de cargas nunca aumenta o conteúdo harmónico, geralmente este tipo de cargas são constituídas por resistências, indutâncias e capacitâncias.

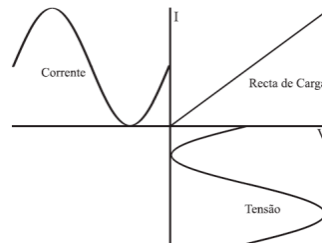


Figura 49 - Características de uma carga linear.

As cargas não-lineares correspondem às cargas que absorvem corrente com forma de onda distinta da forma de onda da tensão que as alimenta (sinusoidal). Este tipo de cargas é essencialmente constituído por electrónica de potência. As suas características são apresentadas na Figura 50.

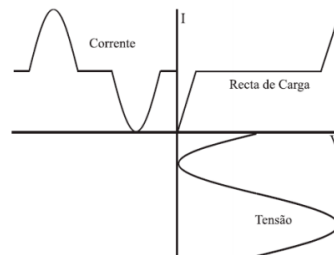


Figura 50 - Características de uma carga não linear.

Isto significa que a forma de onda de tensão de saída também se afastará do ideal, criando problemas na QEE sob a forma de distorção harmónica. A diferenciação entre a forma de onda de tensão aplicada e a forma de onda de corrente acontece devido à constituição deste tipo de cargas relativamente aos componentes utilizados, especificamente à característica tensão-corrente dos componentes. Componentes como resistências, capacitâncias e indutâncias têm característica linear (Figura 49) e componentes como díodos e transístores têm característica não-linear (Figura 50), como mostradas em cima.

Uma carga não-linear pode então ser definida como qualquer carga que utilize pelo menos um componente com característica corrente-tensão não linear. Como referido anteriormente, o afastamento de uma forma de onda em relação à ideal é quantificado pelo THD. Neste sentido, a normalização existente relativa à emissão de conteúdo harmónico por equipamentos estabelece limites de THD e harmónicas individuais. No entanto, as normas exigem limites diferentes

consoante o tipo de equipamento (ver IEC 61000 3-2 em 4.4.2.2). Isto deve-se ao impacto no custo de fabrico de um equipamento que tem a inclusão de um estágio de correção de onda. Tendo como exemplo os casos de uma fonte de alimentação e uma lâmpada LED, o primeiro dota-se de um nível de complexidade avançado em que a inclusão de um estágio de correção de onda não terá um grande impacto no custo do equipamento. O segundo, no entanto, é relativamente simples e a adição de um estágio de correção de onda é suficiente para inviabilizar o fabrico do equipamento. Ainda assim, mesmo os equipamentos que à partida cumprem os limites impostos pelas normas têm tendência a ter as fontes de alimentação substituídas, quando estas avariaram, por outras de menor preço mas que causam maior distorção da forma de onda [23].

A substituição de iluminação incandescente convencional por iluminação eficiente constitui uma das principais fontes de preocupação no que diz respeito à diminuição da QEE na rede de distribuição. As lâmpadas eficientes não consomem corrente de forma contínua, ligando e desligando de acordo com intervalos definidos através de componentes de eletrónica de potência dentro da lâmpada. O tipo de balastro utilizado em lâmpadas fluorescentes (convencional ou electrónico) tem também influência na forma de onda da corrente, [23]. A Figura 51 apresenta a corrente de uma lâmpada fluorescente com balastro convencional electromagnético e com balastro electrónico respectivamente e na Figura 39 apresenta as formas de onda de corrente e de tensão de uma lâmpada eficiente LED (liga e desliga num intervalo de tempo constante).

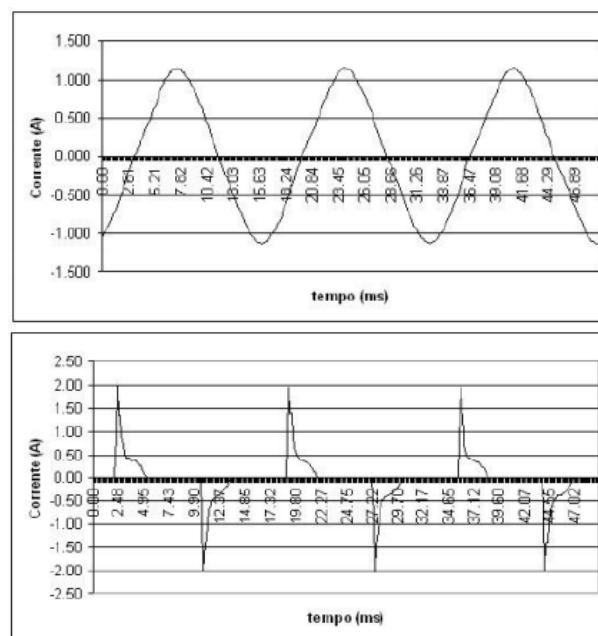


Figura 51 - Corrente de uma lâmpada fluorescente com balastro electromagnético e com balastro electrónico respectivamente [24].

Verifica-se que embora se tratem de equipamentos do mesmo tipo, o conteúdo harmônico presente nas formas de onda de corrente produzida é bastante diferente. Mais recentemente, a iluminação LED tem vindo a ganhar cada vez mais importância devido à sua grande eficiência energética, duas vezes superior à iluminação fluorescente e oito a dez vezes superior à iluminação incandescente, assim como à maior vida útil em comparação com os outros tipos de iluminação referidos. As lâmpadas LED funcionam com corrente DC pelo que, tal como as lâmpadas fluorescentes, necessitam de um retificador para fazer a conversão AC/DC. Como referido anteriormente, a presença do retificador introduz não linearidade no sistema e por consequência, grandes níveis de distorção na forma de onda da corrente produzida como se verifica na Figura 52 [25].

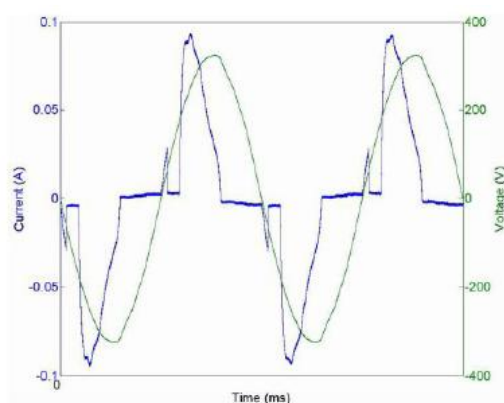


Figura 52 - Corrente e tensão emitidas por uma lâmpada LED de 7 W [25].

Individualmente, as cargas não-lineares geralmente não causam distorção harmônica suficiente para causar problemas na rede. No entanto, a interação de vários tipos de cargas, desde iluminação eficiente a inversores e veículos elétricos em várias instalações ligadas à mesma rede é a maior fonte de preocupação em termos de qualidade de energia elétrica.

2.11. Medição de Potências

Neste capítulo irão ser discutidas medições de potências, mais concretamente no caso não sinusoidal. Primeiro será analisada a transformada de Fourier contida no standard (1459-2010) do IEEE, depois será feita por fim uma descrição sobre a teoria p-q ou (Teoria da Potência Instantânea).

▪ A série de Fourier

Jean Baptist Joseph, barão de Fourier, publicou em Paris no ano de 1822 a sua ópera magna (Théorie Analytique de la Chaleur). Nesta obra Fourier demonstrava que a condução do calor nos corpos sólidos podia ser descrita através de uma série infinita de senos e cossenos. O trabalho estimulou investigações nos mais variados campos da ciência e da técnica, tendo ressaltado que o

tipo de formulação matemática empregada por Fourier era um pré-requisito para a solução de fenômenos que exibiam natureza periódica.

O método de exprimir funções periódicas em termos de somas de senos e cossenos recebe o nome de Análise Harmônica.

O princípio de Fourier é basicamente o seguinte: sendo dado um sinal (função) periódico representá-lo como série de senos e cossenos. Obviamente que se o sinal já for um seno ou cosseno nada mais haverá para dizer (eventualmente, um termo médio não-nulo); mas o nosso intuito é o de extrair informação de onde a haja, i.e., de funções não-sinusoidais. Aos vários termos da série de Fourier, cada um deles de argumento múltiplo inteiro do período da função original, dá-se-lhes o nome de harmônicas, sendo a ordem destes precisamente o valor desse múltiplo [26].

De acordo com a decomposição de Fourier qualquer grandeza periódica não-sinusoidal pode ser representada por uma série infinita de termos composta de:

1. Uma sinusóide de frequência fundamental
2. Sinusóides cujas frequências são múltiplas da frequência fundamental - harmônicas
3. Eventualmente de um termo constante - componente contínua.

A expressão que discrimina a série de Fourier de uma grandeza $x(t)$ vem dada por:

$$x(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} \times A_k \sin(k\omega t - \varphi_k)$$

Em que:

A_0 – o valor da componente contínua, normalmente nula;

A_k – o valor eficaz do harmônico de ordem k;

ω – a velocidade angular da frequência fundamental; $\omega = 2\pi f$

φ_k – o esfasamento inicial do harmônico de ordem k.

A potência é calculada a partir do espectro de amplitude, recorrendo ao Teorema de Parseval:

$$P_x = A_0^2 + \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{A_k^2}{2}$$

O valor médio (ou componente DC) é dado pelo coeficiente A_0 (contribuição da frequência 0).

Espectro de amplitude e de fase:

A onda senoide representada por um fasor (fase + vector), pode-se observar na Figura 53 à direita uma onda distorcida.

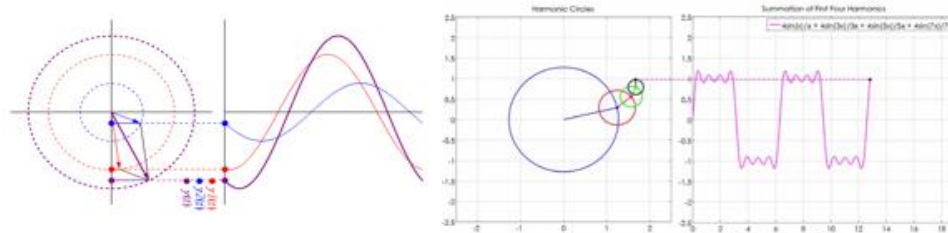


Figura 53 - A Séries de Fourier usanda círculos.

A transformada de Fourier

Usando a função FFT (Fast *Fourier Transform*) do Matlab, deve-se notar que a função é assumida como sendo periódica. O número de pontos FFT é assumido ser o mesmo que as amostras de sinal de domínio de tempo para evitar preenchimento com zeros quando o domínio inteiro é preenchido. A Figura 54 mostra o conceito.

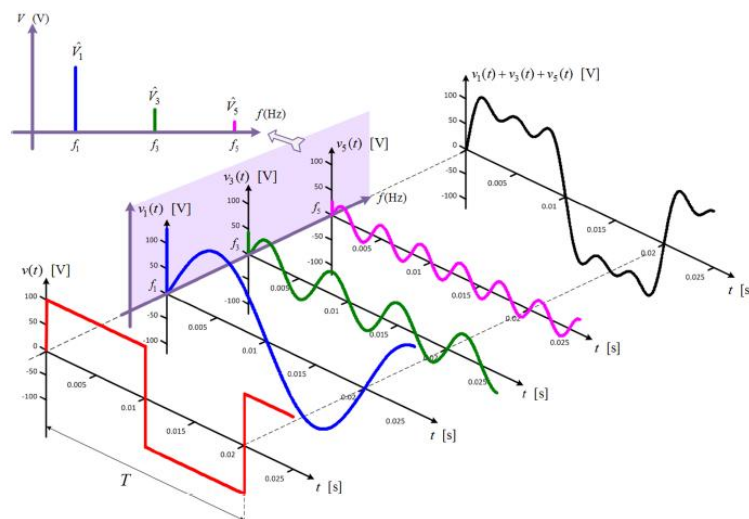


Figura 54 - A transformada de Fourier do domínio do tempo e da frequência [27]

Como podemos observar na Figura 55, no início, um sinal sinusoidal em 50 Hz ($1 \cdot \sin 2\pi 50t$) começa a desenvolver-se lentamente e preenche o domínio completo. Em

seguida, um outro sinal sinusoidal com uma amplitude maior e 100 Hz ($1,5 \cdot \sin 2\pi 100t$) é adicionado a este sinal. Mais tarde, um terceiro sinal sinusoidal de 200 Hz, que substitui a 100 Hz. Depois disso, um componente CC (0 Hz) é inserido e, finalmente, o componente DC é removido [27].

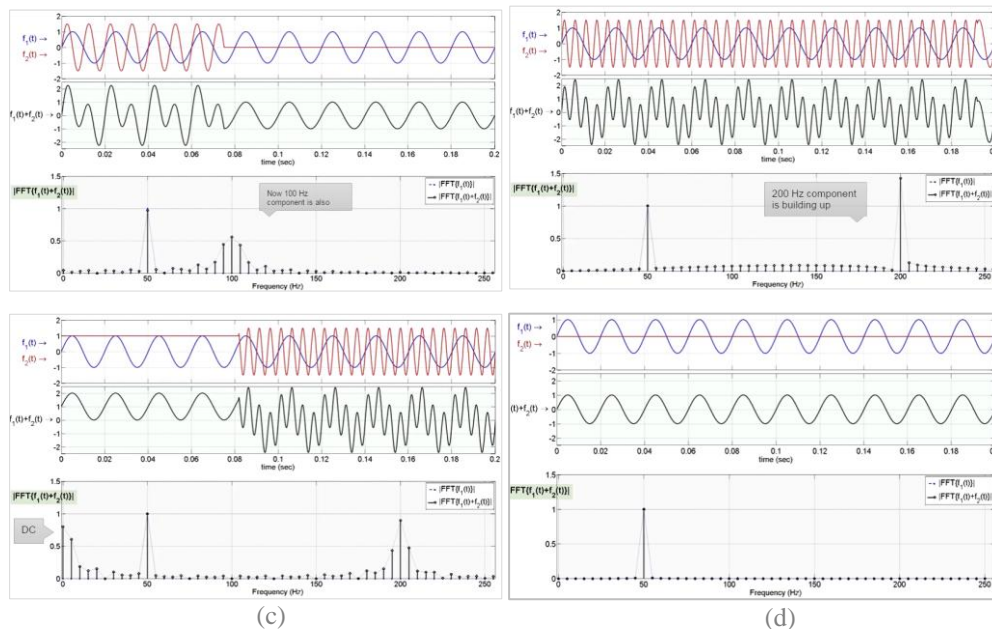


Figura 55 - FFT usando Matlab.

Em cada etapa, o desenvolvimento de componentes de frequência pode ser claramente observado. No espectro de frequência, um primeiro componente 50Hz começa a acumular-se, juntamente com frequências mais baixas e mais altas. A razão para o espectro mais largo é o facto de o sinal sinusoidal preenche o domínio dentro de uma janela de tempo crescente. Assim que o domínio completo é preenchido com o sinusoidal, em seguida, apenas 50 Hz componente permanece devido ao facto de o sinal assume ser periódica em função FFT Matlab.

▪ Teoria p-q

Existem várias teorias onde se pode basear a implementação dos sistemas de controlo dos filtros activos. Destas teorias destaca-se a “teoria geral da potência reactiva instantânea em sistemas trifásicos”, desenvolvida pelo Prof. Akagi, e aqui designada por Teoria p-q (Figura 56). Basicamente esta teoria consiste numa transformação de coordenadas das tensões e correntes dos eixos a-b-c (sistema trifásico normal) para os eixos α - β -0, e do subsequente cálculo das potências nesses novos eixos: p (potência real instantânea), q (potência imaginária instantânea) e p_0 (potência de sequência zero). Após análise à teoria p-q, conclui-se que, os filtros activos atingem seus objectivos através da compensação das potências q, p_0 , e do valor alternado da potência p. A Teoria

p-q simplifica os cálculos necessários aos controladores dos filtros activos, possibilitando dessa forma a implementação dos mesmos com microcontroladores standards [28].

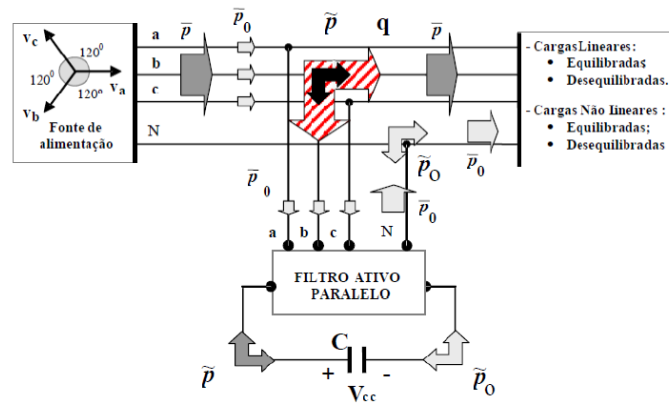


Figura 56 - Componentes de potência sugeridos pela Teoria p-q, juntamente com um filtro activo paralelo.

A potência de distorção D consiste do produto cruzado entre tensões e correntes harmónicas de diferentes frequências. A partir de equação em seguida, a potência aparente pode ser calculada como:

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad S = V \times I = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} = \sqrt{Spq^2 + D^2}$$

Onde Spq é a parcela da potência aparente formada pela potência activa e a potência reactiva. A partir da potência de distorção, D, as potências podem ser representadas graficamente em três dimensões. A Figura 57 apresenta a representação gráfica conhecida como o tetraedro de potência [27].

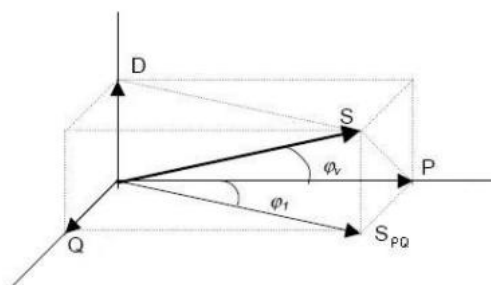


Figura 57 - Possível relação entre potências - activa, reactiva e distorção.

3. Estado da Arte

Neste capítulo são apresentadas as características de oferta mais vasta do mercado em iluminação pública, uma seleção de equipamentos utilizados para monitorizar qualidade de energia, bem como, lâmpadas e equipamentos, luminárias e sistemas de controlo.

3.1. Breve História da iluminação pública em Portugal

Durante milênios, após a descoberta do fogo, o ser humano dedicou esforços na intenção de desenvolver formas de iluminar que pudesse facilitar suas tarefas diárias bem como seus momentos de lazer. Após passar por descobertas como a iluminação com gordura animal e vegetal em lucernas, a lâmpada de Argand, a lâmpada elétrica incandescente de Thomas Edison e suas várias derivações como as lâmpadas halógenas, de vapor e fluorescentes, chegamos a era do Light Emitting Díodo (LED), em português, Díodo Emissor de Luz. Os LEDs chegaram ao mercado de iluminação por volta de 1993, e desde então tem sido vistos como o futuro da iluminação. *EDP Distribuição em Portugal começou a lançá-las no sector de iluminação pública ao fim do ano 2015* [29].

No ano de 8000 a.C., na Mesopotâmia, foram empregadas lâmpadas de óleo. A primeira menção a velas é do ano de 5.000 a.C. Com a ajuda de pratos ou cubas com gordura animal, era colocada uma fibra vegetal que funcionava como fonte de luz. Mas o estado da gordura era líquido, diferente das velas encontradas no Egito antigo, que eram sólidas [4].



Figura 58 - Lâmpadas de óleo na Mesopotâmia [Museu da Lâmpada].

A medida que o homem primitivo se convivia com o fogo, outras descobertas foram sendo feitas, como a utilização de tochas para a iluminação noturna. Interessante observar que mesmo sem nenhum conhecimento, notou-se que quanto mais alto, maior a área de iluminação, lançando já uma ideia de iluminação pública.

Surge o conceito das lucernas, primeiro tipo de luminária que iria ser utilizada durante milênios (Figura 59). As lucernas foram se modernizando e ganhando novos formatos e materiais como as cerâmicas 100 AD e os metais, que futuramente inspirariam a produção das velas. Com as velas e as lucernas, outros tipos de luminárias foram surgindo, como os castiçais e candelabros, usados para apoiar as mesmas.



Figura 59 - Lucernas de cerâmica [Museu da Lâmpada, 2014].

Posteriormente, depois de milênios quanto a primeira lâmpada desenvolvida por Aime Argand em 1783. A lâmpada de Argand (Figura 60), como ficou conhecida, era composta por um pavio inserido no interior de uma chaminé de vidro, por onde passava uma corrente de ar ascendente que auxiliava a combustão, produzindo uma chama estável, de forte intensidade e sem muita fumaça.



Figura 60 - Lâmpada de Argand.

As de óleo foram aperfeiçoadas continuamente até o início do século 20. As de parafina eram amplamente utilizadas em zonas rurais.

Depois de Argand, foi a vez de Willian Murdoch em 1792 descobrir que o gás obtido pela destilação do carvão fóssil seriam um meio de alimentar a chama do fogo dentro de uma chaminé de vidro. Por ser muito caro, ter cheiro desagradável e produzir muita fuligem, exigindo manutenção constante, o mesmo só veio a ser amplamente utilizado em áreas urbanas por volta do século 19, em 1807 quando se tornou a principal fonte de iluminação pública nas ruas de Londres e em 1819 nas ruas de Paris.



Figura 61 - Lâmpada de gás.

Em 1809, o químico inglês Humphrey Davy que colocou uma tira fina de carbono entre os dois pólos de uma bateria, criando um fugaz arco, que se tornou a base que sustenta o funcionamento de uma lâmpada, já em 1840, Warren de la Rue, colocou um filamento de platina dentro de um tubo vazio, onde fez passar eletricidade na qual queimou, emitindo luz e calor. A quase ausência de gás no interior do tubo, juntamente com alta resistência da platina ao calor, permitiu que o material do filamento alcançasse altas temperaturas sem queimar imediatamente. Esta foi a primeira lâmpada de grande durabilidade que temos conhecimento. Só que seu alto preço tornou comercialmente inviável. Nos anos seguintes foram testadas diversas variações do modelo de De la Rue, principalmente em diferentes materiais de filamentos e com um melhor vácuo da cápsula de vidro.

Após 35 anos, Henry Woodward e Matthew Evans fizeram a patente da lâmpada, que era basicamente o mesmo que de De la Rue e outros inventores que vinham desenvolvendo e aprimorado. Em 1850, Swan começou a trabalhar em uma lâmpada utilizando filamentos de papel carbonizado em um bulbo de vidro evacuado. Mas foi em 1879 que finalmente Thomas Edison comprou a patente de Woodward e Evans e desenvolveu seu próprio projeto de lâmpada incandescente. A primeira lâmpada elétrica viavelmente comercializável. Sua lâmpada era composta por um filamento de carbono de alta resistência em um alto vácuo contido em um bulbo de vidro [30].

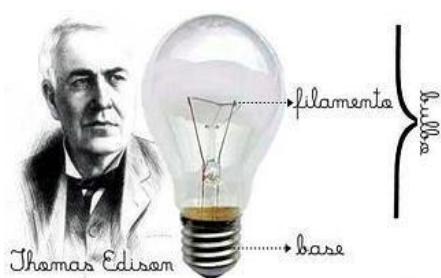


Figura 62 - Lâmpada elétrica incandescente [Museu da Lâmpada].

A primitiva rede eléctrica de Lisboa só foi ampliada em 1903, quando se passou a produzir electricidade nas instalações da antiga fábrica de gás. Só em 1908, com a constituição da Sociedade de Energia Eléctrica do Porto, a iluminação pública passa a ser feita a electricidade e se amplia a rede de distribuição desta fonte de energia e iluminação aos particulares. Em 1892 começando a surgir os primeiros projectos para a iluminação total de uma cidade. Tal é o caso de Braga em 1893, e no ano seguinte Vila Real por iniciativa dos respectivos municípios. O gráfico da Figura 63 evidencia a evolução das várias tecnologias de iluminação em Lisboa, número de candeeiros a azeite, gás, petróleo e electricidade, dos primórdios (Dezembro de 1780) ao tudo eléctrico (Dezembro de 1965).

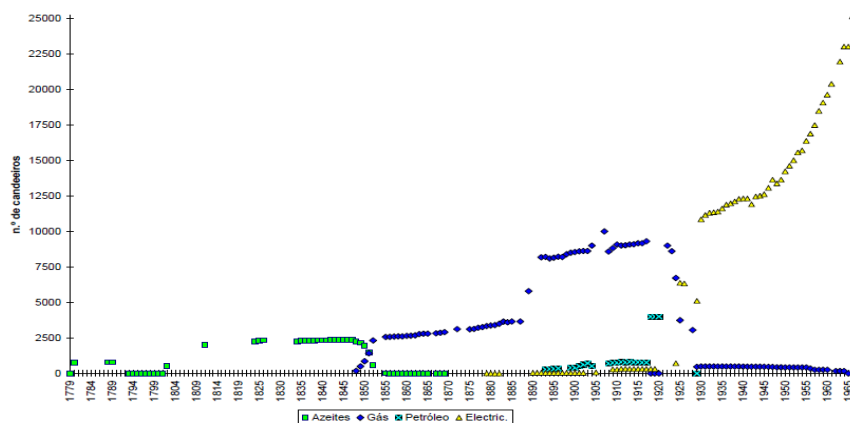


Figura 63 - A Evolução da paisagem tecnológica da Iluminação Pública lisboeta [Município de Lisboa].

As pesquisas não param, e outras lâmpadas, com outros filamentos, com tecnologias mais atuais foram surgindo. Gases inertes são adicionados dentro do bulbo de vidro, evitando que os filamentos queimassem rapidamente. Começam a surgir então as lâmpadas de descarga de alta intensidade (HID).

Em 1901, a primeira lâmpada de vapor de mercúrio é produzida em escala comercial, descoberta por Peter Cooper Hewitt, e que posteriormente evoluiria na década de 30 nas lâmpadas de vapor de mercúrio de alta pressão e um outro tipo de lâmpada a vapor de mercúrio muito importante que pode ser citado, é a chamada lâmpada de luz mista, que é uma lâmpada de vapor de mercúrio que possui no mesmo bulbo um tubo de descarga contendo mercúrio, e ligado em série ao mesmo, um filamento de lâmpada incandescente, ou seja, a lâmpada de luz mista pode ser ligada diretamente a rede elétrica, tal como a lâmpada incandescente.

Após a popularização da lâmpada a vapor de mercúrio sob alta pressão, na década de 60 foi uma questão de tempo para que aperfeiçoamentos da tecnologia começassem a surgir, e um bom exemplo desse fato é a lâmpada de vapor de mercúrio com iodetos metálicos, ou simplesmente, lâmpada de vapor metálico.

E na mesma década de 60 foram desenvolvidas as lâmpadas de vapor de sódio de baixa e alta pressão que estão disponíveis, assim como as lâmpadas de vapor metálico numa enorme gama de formatos, no sistema de iluminação pública, e que estão a ser alvo de substituição faseada por lâmpadas de LED [31, 32].



Figura 64 - Lâmpadas de descarga de alta intensidade.

Com os preços da energia a subir vertiginosamente e os compromissos com programas estruturais para combater as alterações climáticas urge encontrar novas formas de energia e utilizar mais eficientemente a energia que dispomos, torna-se necessário adoptar novas soluções tecnológicas, redesenhar processos e adaptar infraestruturas em todos os sectores. Relativamente à Iluminação Pública, será necessário adoptar novas tecnologias emergentes para fontes de luz (LEDs, SSP e Indução), adaptar as infraestruturas existentes às novas directivas da EU para a eficiência

energética e adaptar os processos de gestão, operação e manutenção às novas tecnologias (conceito smart grids) para Iluminação Pública [12].

O gráfico da Figura 65 mostra-se a linha de tempo das diferentes tecnologias de lâmpadas utilizadas no segmento da iluminação pública:



Figura 65 - Linha de tempo de lâmpadas no segmento da iluminação pública.

No entanto cada tipo de lâmpadas possui características diferentes que devem ser tidas em conta para a sua escolha. As principais características luminotécnicas de uma lâmpada irão agora ser discutidas.

3.2. Tecnologias das lâmpadas aplicáveis em sistemas de IP

No dia 10 de Dezembro de 2004, foi publicado no D.R. o Decreto-Lei N° 230/204 que faz a transposição para o direito interno da Directiva REEE da U.E. sobre aparelhos Eléctricos e Electrónicos e a gestão dos seus resíduos com a qual se pretende melhorar o comportamento ambiental de todos os agentes (produtores, distribuidores e utilizadores) que intervêm no ciclo de vida dos citados aparelhos e em particular, o dos agentes directamente implicados na gestão dos resíduos derivados destes aparelhos.

Há actualmente 304 milhões luminárias de vias públicas no todo mundo. Este número aumentará para 352 milhões de postes totais em 2025 [7]. A iluminação com LED tem-se vindo a impor gradualmente nos últimos anos em todo o mundo. Assim, espera-se que em 2015 cerca de 50% do total de iluminação a nível mundial se realize com soluções baseadas em tecnologia LED

No que respeita a lâmpadas para utilização na IP, existem diversos modelos e diferentes tecnologias disponíveis. As tecnologias de lâmpadas podem-se ser classificadas como mostra Figura 66.

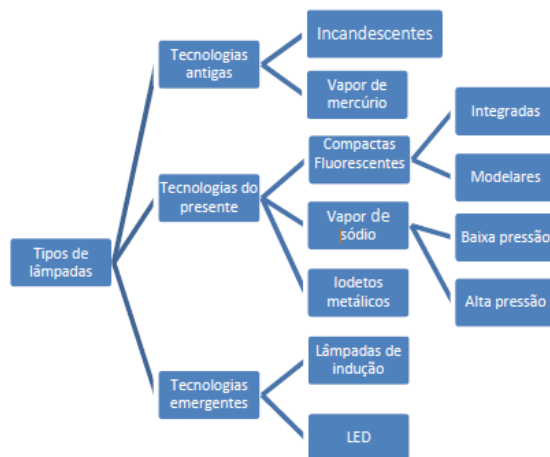


Figura 66 - Uma classificação das tecnologias das lâmpadas na IP.

- **Tecnologias antigas:** As lâmpadas incandescentes e de vapor de Mercúrio são fontes luminosas, que estão neste momento num período de saída do mercado nos sistemas de IP em Portugal. Se já não se encontram praticamente lâmpadas incandescentes, as de vapor de Mercúrio ainda representam um lote significativo no sistema de iluminação pública nacional, responsáveis por cerca de 10% do consumo total neste sector no final de 2008.
- **Tecnologias do Presente:** Devido às suas características e à relação eficiência/custo de investimento e de funcionamento, os tipos de lâmpadas explicitados neste subcapítulo são os mais utilizados atualmente em IP, tais com:
 - Vapor de Sódio (alta e baixa pressão);
 - Iodetos Metálicos;
 - Díodo emissor de luz ou *Light Emitting Diode* (LED).
- **Tecnologias Emergentes:** Actualmente existem duas soluções de sistemas de iluminação que estão a emergir com alguma rapidez no mercado Indução e outra que ainda se encontra num estado embrionário (*Solide State Plasma-SSP*).

LED: Uma perspectiva na história do desempenho e implantação

Com o desenvolvimento de novas tecnologias de fabrico e aparecimento de novos materiais, os LEDs têm vindo a ser produzidos com custos cada vez menores, proporcionando uma gama cada vez maior de aplicações, como sinalização e iluminação de ambientes em geral. (Figura 67) mostra que estamos a assistir ao declínio exponencial dos custos de tecnologias associadas às fontes de energia distribuída (*Distributed energy resources* DERs), tais como LEDs que, estão a reduzir nos

custos enquanto aumentam na capacidade em taxas de aceleração [33]. LEDs seguir a Lei de Haitz que afirma uma redução de 10X em custo e um 10X melhoria da capacidade ocorre a cada 10 anos, como se pode observar no gráfico da Figura 74.

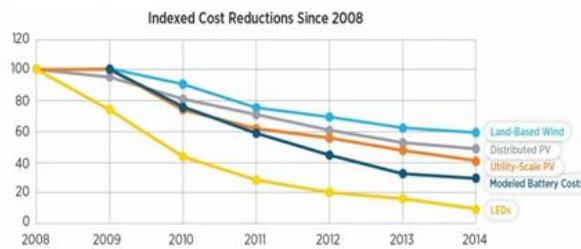


Figura 67 - Descida dos custos para tecnologias de energia limpa [DOE, 2015].

Perspectiva histórica de LEDs

Faço notar que a tecnologia de iluminação actual tem aproximadamente 100 anos. Como pode-se observar nas Figuras seguintes 68 e 69. A primeira utilização dos LEDs foi anterior a 1990 em sistemas de sinalização de baixa potência. Os primeiros LEDs de alta potência começaram a aparecer no mercado em 2004 com eficiência próxima dos 30 lm/W.

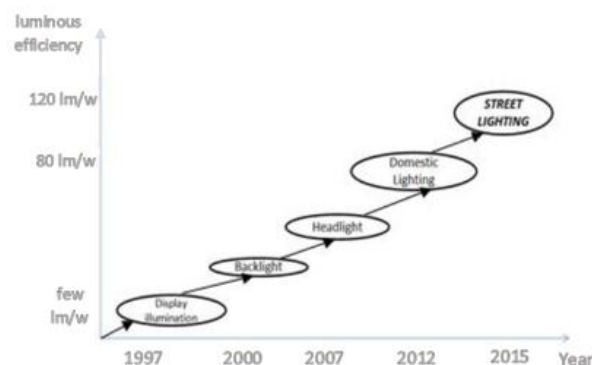


Figura 68 - História passada e expansão projetada das aplicações de LED com base nos previstos aumentos de eficiência luminosa [34].

Em 2006 o LED já apresentava uma eficiência de 50 lm/W e actualmente permitem uma eficiência superior a 100 lm/W. Como podemos observar (na Figura 69), estima-se que se atinja o máximo de eficiência em 2020 com 250 lm/W.

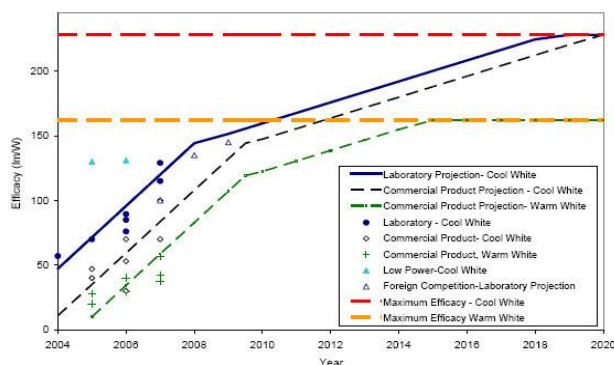


Figura 69 - Histórico e projeção da evolução da eficiência do LED.

Os LEDs começaram apenas como indicadores, mas agora estão a tornar-se a fonte de luz mais eficiente. Como se mostra na Figura 70.

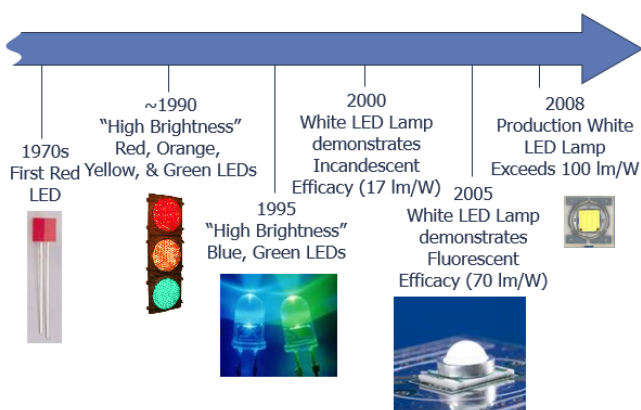


Figura 70 - A evolução de LEDs [CREE].

Por tudo isto, fazendo uma análise global, verifica-se que o LED é a solução mais promissora para a iluminação em geral e em particular de IP. No entanto, por se tratar de uma tecnologia recente apresenta um investimento inicial muito elevado. Devido às duas características que são mais importantes *rendimento luminoso* e *duração de vida média*. No entanto, a solução da lâmpada de indução, poderá ser sempre equacionada como opção, tendo em conta todos os seus constrangimentos. A lâmpada de plasma deverá ser considerada nas situações já descritas uma vez que representa, para essas aplicações, vantagens competitivas relativamente às restantes soluções. No entanto, deverá ter-se em consideração os constrangimentos relacionados com as emissões EMI e temperatura.

De acordo com as características luminotécnicas, foi considerado que os LEDs - devido a todas as suas características, o seu rápido desenvolvimento bem como o desenvolvimento acelerado de normas / recomendações (conforme se apresenta a matriz na Figura 71), são a solução mais eficiente.



Figura 71 - Matriz dos vários tipos de tecnologias da IP.

Tecnologia LED - alguns exemplos existentes no mercado hoje

Gostaria de passar aqui para dar alguns exemplos sobre os LEDs que já entraram no mercado de iluminação de pública para substituir as lâmpadas de descarga. Pelas suas características, os LEDs têm adquirido uma grande preferência por parte dos arquitetos e *lighting designers*, que assim passaram a dispor de um novo recurso capaz de proporcionar concepções de iluminação mais eficientes, funcionais e artísticas.

a) Schröder tipo Teceo 1:

Na Figura 72 pode-se ver um exemplo utilizado no sistema atual da IP e as suas características técnicas são mostradas na Tabela seguinte.



Figura 72 - Exemplo de uma Luminária LEDs existente marca Schröder modelo TECEO1.

Marca	Schröder
Tipo	TECEO 1
Quantidade de LEDs	48 LEDs
Tipo de acessórios	Eletronic
Temperatura de cor	Branco neutro (4100K)
Potência consumida (W)	107
Eficiência min (lm/w)	89
Fluxo nominal (lm)	9523
Tempo de vida útil (horas)	60000 - 100000
IRC	60 a 90

b) Labina modelo Soneres – LUSA:

Outro modelo que está hoje utilizada na IP, marca Labina modelo da Soneres – LUSA. conforme se apresenta na Figura 73.



Figura 73 - Exemplo de uma Luminária LEDs marca Labina.

A luminária Lusa é luminária homologada segundo DMA da EDP. Esta luminária possui um elevado índice de restituição de cor e elevada eficácia luminosa global como pode-se observar as suas especificações fotométricas, bem como as elétricas:

<i>Marca</i>	<i>Labina</i>
Modelo	<i>Soneres</i>
Tipo	<i>LUSA I N/E</i>
Quantidade de LEDs	<i>16 LEDs</i>
Tipo de acessórios	<i>Eletronic</i>
Temperatura de cor	<i>4000K</i>
Fluxo nominal (lm)	<i>3784</i>
Tempo de vida útil (horas)	<i>60000</i>
Potência de entrada (W)	<i>32</i>
Eficiência global (lm/w)	<i>108</i>
Intensidade (mA)	<i>700</i>
Tensão de entrada (Vac)	<i>230</i>
Frequência (Hz)	<i>50</i>
FP	<i>≥ 0,95</i>

c) Schröder modelo Voltana5:

A gama Voltana é a recente solução perfeita para substituir luminárias equipadas com lâmpadas vapor, mercúrio, iodetos e outras lâmpadas de descarga. Foi concebida para proporcionar um desempenho duradouro. O modelo5 que oferece o retorno mais rápido para estradas urbanas estradas secundárias visível na Figura 74.



Figura 74 - Luminária LEDs marca Schröder modelo Voltana5.

<i>Marca</i>	<i>Schröder</i>
Modelo	VOLTANA5
Quantidade de LEDs	64 LEDs
Tipo de acessórios	Eletrónica
Temperatura de cor (K)	4000K Branco neutro
Fluxo nominal (lm)	14600
Tempo de vida útil (horas)	100000
IRC	>70
U _{LOR}	0%
Potência consumida (W)	145
Eficiência min (lm/w)	101
Intensidade (mA)	700
Tensão de entrada (Vac)	120 – 277
Frequência (Hz)	50 - 60
FP	≥ 0,90
Preço (€)	327,90

- Antecipando uma eventual instalação em larga escala, a EDP Distribuição possibilitou aos municípios a instalação a título experimental de um conjunto de aparelhos de iluminação pública com tecnologia LED. Esta instalação em escala reduzida apresenta como vantagens o facto de permitir aos municípios aferir o comportamento desta tecnologia, bem como a reação dos munícipes à alteração da tecnologia tradicional de sódio. *No total foram instalados mais de 6.600 LED em toda a área geográfica de Portugal continental, tendo participado 115 municípios* [29].

3.3. Luminárias

Inicialmente as luminárias tinham por função apenas servir de sustentação e interface de conexão entre as lâmpadas e a rede elétrica. Na Figura 75 é apresentada uma luminária antiga e inadequada, utilizada em iluminação pública, nesta situação é possível observar que a fonte luminosa está exposta a intempéries e outros agentes como vandalismo, insetos, além de não prover o direcionamento do fluxo luminoso adequado para o local onde se deseja iluminar.



Figura 75 - Luminária inadequada para utilização em IP.

Objetivando aumentar a eficiência luminosa da luminária, foram desenvolvidos diversos tipos de conjuntos ópticos, com a função de direcionar a maior parte do fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas para iluminar apenas as áreas de interesse, reduzindo conseqüentemente a poluição luminosa causada pela dispersão de luminosidade, exemplificada na Figura 84. Ainda hoje se encontram muitas luminárias que têm um conjunto óptico razoável, porém são abertas, deixando as lâmpadas expostas a choques térmicos e incidência de insetos, reduzindo sua vida útil. Então, evoluindo o conceito de projeto das luminárias, foram desenvolvidos equipamentos fechados em materiais poliméricos ou vidro, exemplificado na Figura 76.

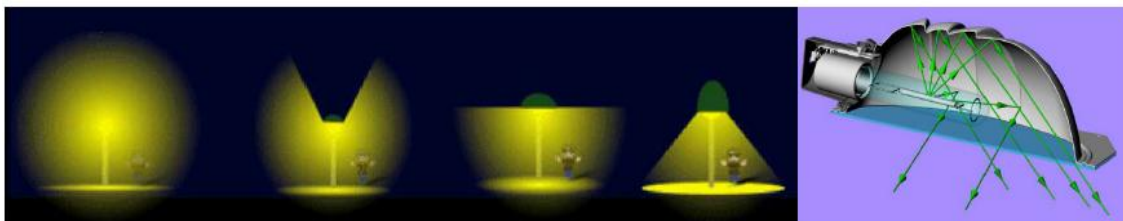


Figura 76 - Da esquerda para a direita está exemplificado o aumento na eficiência luminosa das luminárias. Conjunto óptico eficiente [Indal, 2011].

Uma das principais características das armaduras a ter em conta pelos projetistas no momento do projeto luminotécnico é o índice de proteção da armadura, que deve ser adequado ao local onde esta será montada. O índice de proteção de uma armadura indica a forma como está protegida contra os agentes externos, tais como a humidade, a água e a poeira. Segundo o sistema IP, o índice de proteção, previsto na EN 60529, define a proteção da caixa do equipamento e é definido pelas siglas IP seguido de dois algarismos, onde o primeiro define a dimensão máxima do corpo que pode penetrar na caixa – proteção contra contactos diretos e entrada de corpos externos; o segundo algarismo, por sua vez, define o comportamento em relação a líquidos – proteção contra a penetração de líquidos. A Figura 77 mostra-se o conceito. Uma letra opcional pode completar os dois valores de IP, e indica a capacidade do invólucro em proteger as pessoas contra o acesso a partes perigosas.



Figura 77 - Exemplos de luminárias LED e luminária com lâmpada VSAP.

Os componentes constituintes de uma luminária são:

- **Suporte das lâmpadas:** mesmo quando a luminária é sujeita a vibrações, este componente deve assegurar que o posicionamento da lâmpada permaneça inalterável e destina-se também a garantir o contacto elétrico adequado com a aparelhagem auxiliar;
- **Corpo da luminária:** tem como função proporcionar o suporte mecânico a todos os componentes. Deve apresentar uma boa resistência mecânica a choques e vibrações no sentido de garantir as condições de fixação e normal funcionamento das lâmpadas e aparelhagem auxiliar;
- **Órgão de fixação da luminária:** tem como função fixar a luminária ao poste, podendo ou não ser parte integrante da própria luminária, assegurando a não existência de oscilações após o seu correto posicionamento;
- **Refletor:** dispositivo que serve para modificar a repartição espacial do fluxo luminoso de uma fonte luminosa utilizando essencialmente o fenómeno de reflexão. No que diz respeito ao índice de reflexão é óbvio que quanto mais clara for a cor de um corpo, melhor este corpo consegue refletir. Desta forma um refletor “lacado” a branco terá uma reflexão superior a qualquer outro tipo de material (eg. alumínio), no entanto o “lacado” tem o contra do envelhecimento, ou seja, com o tempo e com o pó a cor deixa de ser branca (amarelecimento), enquanto o mesmo tipo de difusor em alumínio, independentemente do ambiente ao qual está sujeito, consegue manter as suas características iniciais durante mais tempo, sendo, por isso, do ponto de vista do longo prazo, a opção por um refletor em alumínio a mais acertada. No que respeita à rugosidade, existem vários tipos de qualidades de alumínio – alumínio com uma pureza de 99,8%, até ao alumínio com 99,99% de pureza – este último é o que apresenta a superfície mais plana, conseguindo assim refletir com maior intensidade, pois o fluxo não se dispersa;
- **Refratores:** são tipicamente constituídos por vidro ou materiais plásticos e destinam-se a alterar a distribuição do fluxo luminoso, mediante refração. Os materiais que os constituem devem proporcionar resistência a choques mecânicos, bem como às agressões provocadas pelas diferentes condições climáticas, permitindo a conservação de uma boa aparência com o decorrer do tempo;

- **Difusores:** este componente evita que a luz seja enviada diretamente da lâmpada para os objetos ou pessoas. Assim, o seu propósito é diminuir a luminância das lâmpadas, no sentido de proporcionar um melhor conforto visual e são normalmente construídos em vidro ou plástico.
- **Dispositivos de regulação:** em alguns casos, de modo a proporcionar maior versatilidade de utilização, existem dispositivos de regulação que permitem a adaptação das características da distribuição luminosa da luminária à superfície a iluminar ou então a diferentes tipos de lâmpadas.

Com as novas gerações de luminárias, já disponíveis no mercado, é possível tornar os sistemas de iluminação pública cada vez mais eficientes e aplicados racionalmente. Existe, atualmente, uma gama de produtos versáteis que dispõem de tecnologia e *design* que acentuam de forma atrativa o meio envolvente e proporcionam a iluminação do futuro, em ligação com as normas em vigor, facilidade de manutenção e duração. Com o uso de luminárias eficientes consegue-se também diminuir em muito a dispersão de fluxo luminoso, minimizando ao máximo a poluição luminosa. Os estágios principais de uma luminária de LED são os seguintes:

- LEDS
- Driver (s)
- Dissipador de calor
- Elementos ópticos (lente, refletor e difusor)
- Elementos básicos (contato elétrico, alojamento do circuito eletrónico e da placa de LED).

A Figura 78 mostra-se um exemplo de uma luminária de novas gerações.

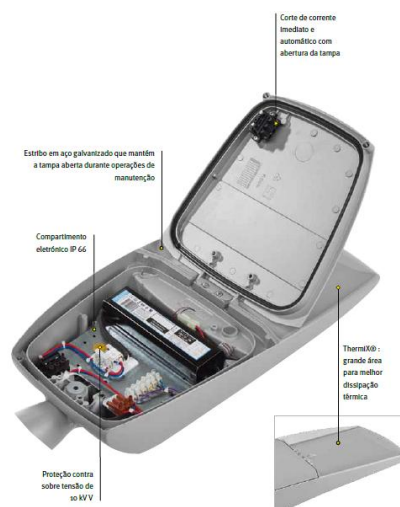


Figura 78 - Exemplo de uma armadura de uma luminária LED actual [Schröder].

Na Figura 79 é apresentado exemplos de armaduras equipadas com lâmpadas de indução, que poderão ser utilizadas na iluminação exterior como por exemplo em postes de iluminação de difícil acesso ou junto a linhas de AT e MAT, túneis, tecto de indústrias muito altos e de difícil acesso, entre outros.



Figura 79 - Armaduras equipadas com lâmpadas de Indução.

Existem luminárias de difusor em vidro, em que o vidro beneficia de um tratamento auto limpável (conforme se mostra na Figura 80) reduzindo a sujidade exterior. O tratamento auto limpável torna hidrófila a superfície do vidro, o que significa que a chuva se espalha sob a forma de uma película de água em vez de gotas de água, eliminando assim os resíduos que foram decompostos pelos raios UV da luz do dia. [35].



Figura 80 – Luminária com difusor em vidro auto-limpável.

Nos últimos tempos surgiram tecnologias que estão a revolucionar os sistemas de iluminação pública do mundo – Luminárias alimentadas por energias renováveis conforme se mostra na Figura 81.



Figura 81 - Luminária alimentada por energia solar.

Estes sistemas possuem fontes alternativas alimentadas pela conversão da luz solar em eletricidade, através de painéis fotovoltaicos ou pela conversão das massas de vento em eletricidade, através de um cata-vento acoplado a um gerador. Esta opção é bastante vantajosa para locais remotos ou de difícil acesso, pois apresentam um custo de produção inferior ao da eletricidade. Este tipo de tecnologia evita os elevados investimentos necessários para a construção de novas redes de transmissão.

Quanto ao tipo de equipamento, este pode ser classificado:

- **Qualificado:** equipamento que corresponde às especificações da EDP, tornando-se candidato a equipamento corrente.
 - **Corrente:** melhor compromisso técnico-económico dentro dos modelos qualificados pela EDP, conforme contrato de concessão;
 - **Não Corrente:** material de uso frequente do Município que foi considerado como de fornecimento EDP no contrato de concessão;
- **Equipamento Não Qualificado:** equipamento com características especiais ou padrões de qualidade diferentes dos aprovados pela EDP, de utilização pontual no município.

O objetivo da qualificação é o apoio a projetos piloto de iniciativa dos municípios, segurança elétrica e mecânica, integração com a rede de iluminação pública existente e garantir as características construtivas que visem o bom funcionamento ou a sua durabilidade.

3.4. Equipamentos acessórios - drivers

A Tabela 9 apresenta-se uma comparação dos conversores DC-DC que são utilizados no sistema de controlo o LED, que se têm vindo a descrever. Consideradas as vantagens e desvantagens das várias topologias, entende-se que a melhor configuração é a do conversor SEPIC, por não utilizar um transformador, compensar o factor de potência, não ter o sinal de tensão na saída invertida em

relação ao sinal na entrada e ter valores de rendimento e THD dos melhores entre as configurações analisadas⁶.

Tabela 9 - Comparação das várias topologias para andar Powe Factor Correction [14].

Topologia do conversor	<i>Buck-Boost</i>	<i>Forward</i>	<i>Flyback</i>	<i>Cuk</i>	<i>SEPIC</i>
Transformador	Não	Sim	Sim	Não	Não
Ganho de tensão	$\frac{-D}{1-D}$	$D \frac{N2}{N1}$	$\frac{D}{1-D} \frac{N2}{N1}$	$\frac{-D}{1-D}$	$\frac{D}{1-D}$
Filtro EMI	Sim	Não se aplica	Não se aplica	Não	Não
Integração em single-stage	Sim	Não	Não	Sim	Sim
Factor de potência	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Rendimento	85 %	-	-	80 %	86 %
THD	8,016 %	-	-	17,53%	9,61 %

Em relação à regulação de fluxo (*dimming*) das lâmpadas LED, pode-se observar um exemplo actual dos drivers de LED que estão utilizados neste trabalho através a Tabela 10 as características deste equipamento.

Tabela 10 - As características técnicas de um driver de lâmpada LEDs atual LG Innotek.

Característica	Unidade	
Marca	<i>LG Innotek</i>	
Modelo	<i>PISE-A150D</i>	
Potência (W)	<i>Max. 150W</i>	
Saída	Tensão (Vdc)	<i>125-280</i>
	Intensidade (A)	<i>0.35-0.7</i>
Tensão de entrada (Vac)	<i>120 - 277 VAC</i>	
Type of <i>Dimming</i>	<i>0 - 10 V</i>	
Eficiência	<i>UP to 93%</i>	
THD	<i>< 20%</i>	
PF	<i>>0.9</i>	

⁶ Sendo que (D representa o ciclo de trabalho (duty cycle), N₁ número de espiras do primário; N₂ número de espiras do secundário).

Alguns modelos destinados a sistemas eletrônicos de baixa potência apresentam também um MOSFET integrado ao CI, entre eles: como o LinkSwitch-TN, da empresa Power Integrations, e o NCP101x, da empresa OnSemiconductor, possuem ainda um circuito interno para alimentação do CI bastante prático, reduzindo o número de componentes externos. Alguns destes modelos são apresentados no Anexo A aplicados aos conversores *Buck* e *Flyback*, respectivamente.

3.5. Analisadores de energia elétrica

Os sistemas elétricos e eletrônicos influenciam a qualidade da energia de muitas maneiras. Torna-se, portanto, necessário monitorizar a QEE de modo a serem tomadas medidas de prevenção e mitigação dos factores que levam à sua degradação.

A utilização de monitorizadores de qualidade de energia é a melhor forma de detectar e diagnosticar problemas nos sistemas elétricos de potência. Estes equipamentos permitem, basicamente, medir e registar ao longo do tempo valores de tensões, correntes e potências em vários canais. Com base na informação que vai sendo recolhida é então possível gerar alarmes (eventualmente em tempo real) e produzir relatórios de diversos tipos, seleccionando aplicações tais como:

- Aplicação osciloscópio e distorção harmónica – O equipamento funciona como um osciloscópio de vários canais e permite ainda calcular valores médios, (true rms), máximos e mínimos, de tensões e correntes. Pode ainda identificar as harmónicas e calcular os valores do conteúdo harmónico total THD.
- Aplicação “forma de onda” – Permite detectar anomalias nas formas de onda das tensões, armazenando esses eventos juntamente com o instante da ocorrência.
- Aplicação “sobretensões e subtensões momentâneas” – Detecta e regista estes fenómenos, juntamente com o instante em que ocorrem e a sua duração.
- Aplicação “grandezas clássicas” – Permite o cálculo de valores de amplitude e fase de tensões e correntes, impedâncias, potências aparente, activa e reactiva, factor de potência medidas de energia, valores relativos a desequilíbrios de fases, etc.

No mercado existe um leque bastante variado de equipamentos para monitorizar a qualidade da energia eléctrica. Contudo, estes equipamentos são normalmente muito caros, sobretudo os que apresentam bons desempenhos e múltiplas funções. Por essa razão é ainda hoje interessante desenvolver sistemas de monitorização virtuais baseados na utilização de PC's, placas de aquisição de dados standard e ferramentas de desenvolvimento do tipo LabView, uma vez que é possível

conseguir soluções com características interessantes a custos muito mais baixos. No contexto deste trabalho vão ser distinguidos três tipos de equipamentos, sendo estes:

- Equipamentos portáteis.
- Equipamentos fixos.
- Circuitos Integrados (CI) especiais para monitorização da QEE.

No âmbito deste documento entende-se por *equipamentos portáteis*, aqueles que necessitam de ser transportados até a um ponto na rede para efectuarem a monitorização de energia. Por isso será falando mais especificamente sobre este tipo. Os *equipamentos fixos* são aqueles que podem ser embebidos na instalação eléctrica. Os *CI* especiais para monitorização da QEE são aqueles apresentam funcionalidades ou que foram especialmente projectados para permitir a monitorização dos parâmetros associados à QEE.

I. Equipamentos portáteis

Os analisadores de energia portáteis constituem uma das formas de monitorização mais utilizadas pelos Operadores da Rede de Distribuição (ORD). Estes equipamentos são instalados por uma equipa técnica no local em questão, que pode ser a instalação de um cliente ou um ponto de monitorização periódica, como um posto de transformação. O equipamento permanece instalado durante um determinado período de tempo até voltar a ser recolhido para que a informação obtida seja posteriormente analisada. De seguida é analisado um destes equipamentos que está utilizado neste trabalho.

Fluke 1760 – PQ Recorder/Analyzer

Usando o analisador de Qualidade de Energia Trifásica Fluke 1760 ilustrado na Figura 82, que está em conformidade total com a norma IEC 61000-4-30 Classe A. Concebido para analisar sistemas de distribuição de energia eléctrica em redes de MT e BT e para monitorizar parâmetros de QEE como harmónicas pares e ímpares até 50x a componente fundamental e THD de tensão e corrente segundo a norma EN50160.



Figura 82 - Analisador de energia Fluke 1760.

Características (conforme se mostram na Tabela 11) são as seguintes[36]:

- Totalmente compatível com a Classe A;
- Sincronização com o tempo GPS;
- Limites e factores de escala flexíveis e totalmente personalizáveis;
- Unidade de alimentação ininterrupta (UPS) (40 minutos);
- Captação de formas de onda de 10 MHz;
- Memória de dados de 2 GB;
- Software completo PQ Analyze software;

Tabela 11 - Características do analisador de energia Fluke 1760.

Entradas digitais	4 sondas de tensão de 600 V;	
	4 sondas de corrente flexíveis de gama dupla (1000 A / 200 A AC);	
Harmónicas (n)	1 a 50 de acordo com a norma IEC 61000-4-7	<25 % of VRMS fundamental up to a THD of 50 %
		≥1 % Vnom: ±5 % of reading
		< 1 % of Vnom: ±0.05 % of Vnom
		as per IEC 61000-4-7:2002 and amendment 1:2008, IEC61000-2-4 Class 3
Interharmónicas (n)	1 a 50 de acordo com a norma IEC 61000-4-7	<25 % of VRMS fundamental up to a THD of 50%
		≥1 % Vnom: ±5 % of reading
		< 1 % of Vnom: ±0.05 % of Vnom
		as per IEC 61000-4-7:2002 and amendment 1:2008
Tensão	0 to 100 %	±0.15 % absolute deviation
Corrente	0 to 100 %	±0.1 % absolute deviation
Flicker	as per IEC 61000-4-15:2003: 10 min (Pst), 2 h (Plt) ⁷	
Factor de potência	Resolução 0.001 Precisão ± 0.1%	
Erro de ângulo de fase	< ±0.5 °	

⁷ Pst: Severidade da perturbação de flicker de curta duração, é calculado por IEC 61000-4-15. Salvo especificado Pst=10min. Plt: Severidade da perturbação de flicker de longa duração é calculado a partir da equação $Plt =$

$$\sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N Pst^3, i}{N}}$$

Uma das particularidades deste aparelho, está no facto de determinar o Factor-K. Conforme o conteúdo harmónico das cargas a ligar aos mesmos, ou instalar transformadores com K-Factor já definido pelo fabricante para o tipo de cargas que se vai alimentar [36].

Fluke 434 Series II Energy Analyzer

Para além de monitorizar parâmetros de QEE como harmónicas até ao 50º e THD de tensão e corrente de acordo com a norma IEC 61000-4-7 (confira subcapítulo 4.4.2.2), o Fluke 434, ilustrado na Figura 83 utiliza um calculador de perdas para medir os custos ligados diretamente à fraca qualidade de energia elétrica.



Figura 83 - Analisador de energia Fluke 434.

A Tabela 12 apresenta-se os principais parâmetros referentes a qualidade de energia medidos por este equipamento [38].

Tabela 12 - Características do analisador de QEE Fluke 434.

	Intervalo de medição	Resolução	Precisão
Factor de potência	0 a 1	0.001	± 0.1%
Perdas	Variável		± 1% ± 10
Harmónicas (n)	1 a 50 de acordo com a norma IEC 61000-4-7		
Interharmónicas (n)	1 a 50 de acordo com a norma IEC 61000-4-7		
Tensão	0.0 % a 100 %	0.1 %	± 0.1% ± n x 0.1 %
Corrente	0.0 % a 100 %	0.1 %	± 0.1% ± n x 0.1 %
Energia	0.0 % a 100 %	0.1 %	± n x 2 %
Angulo de fase	-360° a +0°	1°	± n x 1°
Tremulação (flicker)			
Plt, Pst, Pst(1min) Pinst	0.00 a 20.00	0.01	± 5 %
Desequilíbrio de tensões			
Tensão	0.0 % a 20.0 %	0.1 %	± 0.1 %
Corrente	0.0 % a 20.0 %	0.1 %	± 1 %

II. Equipamentos fixos

São equipamentos de monitorização de QEE que são colocados permanentemente num ponto da rede de distribuição, não necessitando de deslocação de técnicos quando é necessário monitorizar um ou vários parâmetros de qualidade de energia. Comparativamente aos equipamentos portáteis, estes equipamentos apresentam capacidades superiores de análise da qualidade de energia, nomeadamente a nível da distorção harmónica, mas têm custos superiores.

Elspec G4430 BLACKBOX

Este equipamento, ilustrado na (Figura 84) permite a monitorização de harmónicas até ao 511º de acordo com a classe A da norma IEC 61000-4-30, tem 16 GB de memória interna e permite gravar todos os parâmetros medidos até um ano [39].



Figura 84 - G4430 BLACKBOX [39].

Os parâmetros analisados por este equipamento são os seguintes:

- Harmónicas de tensão até 511º
- Valores RMS (tensão e corrente)
- THD (tensão e corrente)
- Desequilíbrio de tensões
- Variações de tensão

III. Circuitos Integrados

Os circuitos integrados têm custos bastante reduzidos em comparação com os equipamentos analisados anteriormente e podem ser associados a diferentes componentes, incluindo smart meters, com o objetivo de dar a esses componentes novas funções de monitorização de qualidade de energia.

Escolha da topologia

Como anteriormente referido, *os equipamentos portáteis* necessitam de ser transportados até um ponto da rede para realizarem a monitorização de parâmetros. Este tipo de equipamento são tradicionalmente caros face a outros equipamentos, sendo utilizados maioritariamente em indústrias. Apresentam uma interface de utilização intuitiva e um aspecto físico maior comparativamente com os *CI* especiais. *Os equipamentos fixos* têm a vantagem de serem colocados num ponto da rede para monitorização, através de adaptadores próprios, e não precisarem assim de serem transportados sempre que se pretender monitorizar algum parâmetro. Estes equipamentos apresentam, tal como os equipamentos portáteis, um custo elevado comparativamente com os *CI* para monitorização da qualidade de energia. Apresenta uma interface intuitiva o que permite ao utilizador usufruir facilmente de todas as funcionalidades do equipamento. Os *CI* especiais para monitorização de energia são componentes que apresentam um custo reduzido, face aos equipamentos indicados anteriormente, e podem ser associados a outros componentes para realizar a monitorização dos parâmetros associados à QEE. Estes componentes têm muitas das vezes associados a si um software intuitivo que permite a visualização dos parâmetros monitorizados. Quando aos associados a outros componentes, é possível obter os dados através da programação de todos os componentes. Os *CI*s apresentam um datasheet complexo com informação detalhada acerca das suas funcionalidades.

3.6. Sistemas atuais de controlo e gestão de energia na IP

A energia elétrica consumida na iluminação pública constitui uma despesa não desprezável, que deve incitar os responsáveis a pôr em prática ações que permitam a sua poupança. Uma iluminação eficiente proporciona elevadas reduções na carga total da iluminação, embora estas reduções variem em função das tecnologias aplicadas. É uma questão de economia, de poupança que é vantajosa tanto para os consumidores como para os produtores de energia pois poderão satisfazer um maior número de clientes sem investir em infraestruturas adicionais de produção.

Fruto do trabalho conjunto entre as Câmaras Municipais e a EDP, lançaram-se projetos-piloto na área da melhoria da eficiência energética da Iluminação Pública, através da experimentação de novas tecnologias:

Dado que os circuitos de iluminação pública se destinam a funcionar apenas numa fração do dia, será necessário prever o seu controlo. De acordo com o tipo de via em que o circuito de iluminação atual, o seu controlo assumirá uma maior ou menor complexidade. Assim, o controlo poderá assumir a forma simples de ligação e corte totais, pré-programados, ou ter associado uma forma mais ou menos complexa de controlo de fluxo luminoso. Conforme se mostram na Figura 85.

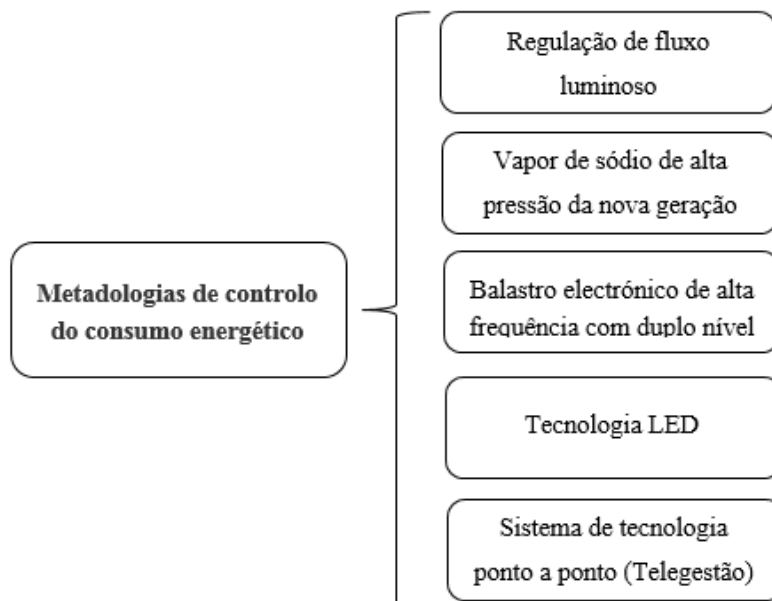


Figura 85 - Metodologias atuais de controlo de energia na IP [EDP, 2015].

O controlo de fluxo pode ser vantajoso na medida em que existem soluções técnicas que, garantindo condições para que a circulação noturna se faça com segurança, permitem uma utilização racional de energia, dado que existem períodos nos quais não é necessário que os focos luminosos emitam a luminosidade máxima aconselhada. O controlo dos circuitos de iluminação pública é feito com recurso a:

Sensores crepusculares: a célula fotoelétrica (ilustrada na Figura 86) existente no interruptor crepuscular irá reagir à mudança de luminosidade, ligando ou desligando a iluminação conforme o nível estipulado, permitindo, desta forma, gerir racionalmente o funcionamento dos circuitos de iluminação pública. A colocação da fotocélula poderá ser à cabeceira enviando o sinal a um conjunto de luminárias, ou então poderá ser parte integrante de cada ponto de iluminação individual.



Figura 86 - Sensor crepuscular

Relógio astronómico: o relógio astronómico (ilustrada na Figura 87) é uma solução de comando *on-off* cujo horário de funcionamento encontra-se enquadrado na variação do ciclo solar ao longo do ano. O relógio é inserido nos postos de transformação que alimentam os circuitos de potência da

iluminação, é regulado de acordo com o horário estabelecido para o acendimento e corte da iluminação pública e permite uma programação diária ou semanal. A grande vantagem em relação a um sistema interruptor horário antigo é que adapta o controlo da rede de IP ao horário respeitante à altura do ano. Por exemplo, o sinal transmitido para acender a iluminação pública será emitido mais cedo no Inverno do que no Verão, sem qualquer tipo de intervenção humana. O relógio astronómico tem as seguintes características de funcionamento:

- Cálculo diário, para as ações ligar / desligar, considerando a latitude e longitude, em graus e minutos, do local onde se encontra;
- Válido para qualquer região geográfica de qualquer hemisfério tendo apenas que o programar previamente;
- Alteração automática do horário de inverno e verão;
- Possibilidade de outro tipo de programação que não a programação astronómica (*default*);
- Possibilidade de inclusão no ciclo de funcionamento astronómico de uma programação diferente para dias festivos e feriados.



Figura 87 - Relógio Astronómico

3.5.1 Balastos duplo nível da lâmpada VSAP

O balastro electrónico de duplo nível é uma unidade compacta que substitui todos os componentes convencionais relacionados com a lâmpada: condensador, balastro ferromagnético e ignitor, componentes que constituem o actual sistema eléctrico auxiliar ao bom funcionamento da lâmpada de VSAP. Na Figura está esquematizada uma das formas conhecidas deste sistema de duplo nível. Conforme se mostra na Figura 88.



Figura 88 - Balastro electrónico de duplo nível [EcoLum].

A programação da comutação de um valor de reatância para outro é feita de uma forma simples, através de um contacto temporizado existente num contactor alimentado pelo circuito de potência derivado do posto de transformação. Este contactor, por sua vez, alimenta o balastro.

Este sistema de duplo nível apresenta uma série de vantagens face aos sistemas convencionais e por outro lado apresenta desvantagens [EDP,2009]: Vantagens:

- Pode facilmente controlar o fluxo luminoso da luminária com uma redução de 40% da potência;
- Absorve as variações de tensão da rede (entre 190V e 253V);
- Baixo consumo;
- pode facilmente controlar o fluxo luminoso da luminária com uma redução de 40% da potência;
- Elevado factor de potência;
- Aumentam a vida útil da lâmpada;
- Substitui o arrancador e condensador.

Desvantagens:

- As estratégias mais complexas do que para conversores convencionais;
- Temperatura de funcionamento da lum;
- Equipamento electrónico;
- Incerteza na fiabilidade/durabilidade quando exposto à intempérie;
- Preço.

3.5.2 Sistema de tecnologia de controlo ponto a ponto em luminárias de iluminação pública existentes

O sistema permite a gestão e controlo ponto a ponto via rádio frequência de cada luminária e uma programação flexível da regulação de fluxo ao longo do período de utilização diária, semanal, mensal e anual, considerando eventos, feriados e emergência. Individualmente cada luminária pode ser ligada/desligada e com o fluxo luminoso regulável (dimming) a qualquer momento.

Graças a uma comunicação bidirecional, o estado de operacionalidade, as falhas e o consumo de energia serão reportadas e armazenadas num banco de dados com a data e a localização geográfica exatas. Em caso de falha temporária do sistema, este continua a funcionar de acordo com a última parametrização, e se essa se perder, desde que os pontos de luz estejam sujeitos à tensão nominal da rede, ligam automaticamente as lâmpadas a 100% do fluxo nominal sem necessidade de intervenção externa[41]. O sistema de Telegestão é constituído por (Figura 89):

- Sistema Central de Gestão (CMS): é usado para controlar os vários segmentos do sistema de IP, gerindo a informação transmitida pelos controladores (da luminária e de segmento);

- Controlador de Segmento (SC): as luminárias estão ligadas a uma cabina exterior de alimentação e comunicam através do controlador de segmento;
- Controlador da Luminária Exterior (OLC): é o aparelho que faz o controlo do balastro/*driver* programável da fonte de luz e de todos os sensores existentes na luminária, proporcionando um sistema de iluminação dinâmico. Atualmente este controlador também já é apresentado como parte integrante da luminária.

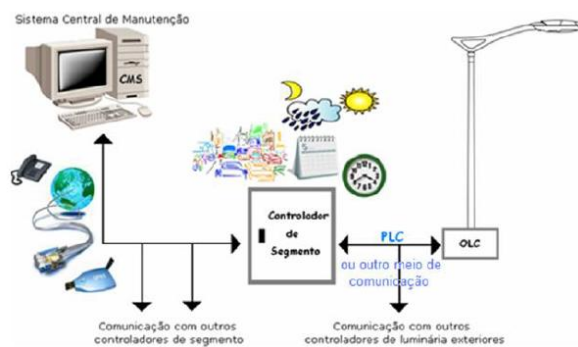


Figura 89 - Esquemática de um sistema de telegestão de uma rede de IP.

Conclusões na Tabela 13.

Tabela 13 - Medidas de implementação no sector de IP.

Características	Sensore crepusculare	Relógio astronómico	Regulador do fluxo	LED driver (dimmer)	Telegestão
Função on-off	✓	✓	✓	✓	✓
Possibilidade de dimming	✗	✗	✓	✓	✓
Calendarização ou programação	✗	✓	✓	✓	✓
Aumento do tempo de vida das lâmpadas	✗	✗	✓	✓	✓
Detecção de falhas	✗	✗	✗	✗	✓
Cálculo das poupanças de energia e CO ₂	✗	✗	✗	✗	✓
Armazenamento da informação	✗	✗	✗	✗	✓
Comunicação com o gestor da rede da IP	✗	✗	✓	✓	✓

Poupança	○	◐	◑	◒	●
Custo	○	◐	◑	◒	◓

○ Baixo ● Alto

4. Qualidade de energia eléctrica

Na literatura consultada existem várias definições para Qualidade de Energia Elétrica (QEE), ou Power Quality (PQ) na língua inglesa. A entidade IEEE define a QEE como: “Conceito de alimentação e aterramento de equipamentos sensíveis, de forma a que estes funcionem normalmente” [43]. A norma IEC 61000-4-30 define a QEE como: “Características da eletricidade num determinado ponto do sistema eléctrico, comparativamente a um conjunto de parâmetros técnicos de referência” [44]. Em algumas referências, o termo qualidade de energia eléctrica refere-se ao afastamento da forma de onda de tensão ou corrente no ponto medido em relação à ideal[45]. De acordo com a última definição, assumindo que a forma de onda da tensão ideal é uma senoide com frequência e amplitude constantes, iguais aos seus valores nominais, e assumindo também que a corrente possui frequência e amplitude constantes, sendo a sua frequência e fase iguais às da tensão, qualquer variação relativamente aos valores nominais da tensão e corrente é considerada como perturbação.

Neste capítulo serão abordados os principais perturbações e normas associados à QEE.

4.1. Conceitos associados à qualidade de energia

A QEE está relacionada com um conjunto de fenómenos que podem ocorrer no sistema eléctrico e está associado a todos os problemas de energia manifestados na tensão, corrente ou em variações

de frequência resultantes de uma falha ou má operação de equipamentos de consumidores. Estes problemas podem ocorrer em várias partes do sistema de energia, seja nas instalações de consumidores ou nos sistemas de abastecimento de energia, devido à utilização de cargas não lineares e dos equipamentos utilizados possuírem uma maior sensibilidade a distúrbios da QEE [44]. Deste modo, para análise do impacto dos problemas de QEE é necessário abordar dois temas, que são imprescindíveis e que necessitam de ser assegurados para que haja qualidade de energia eléctrica, nomeadamente[46]:

- **Continuidade de serviço:** esta refere-se à fiabilidade do abastecimento contínuo da tensão, caracterizada pelo número e duração das interrupções de fornecimento de energia eléctrica.
- **Qualidade da onda de tensão:** dever ser representada pela amplitude, frequência e simetria do sistema trifásico de tensões. Deste modo, as formas de onda de tensão devem ser sinusoidais, com frequência de 50 Hz /60 Hz e desfasadas de 120° no tempo.

- ***A origem das perturbações da qualidade de energia eléctrica***

Durante anos a maioria dos equipamentos ligados à rede de energia eléctrica utilizavam cargas lineares, robustas e pouco poluidoras. Com a evolução da electrónica de potência os equipamentos apresentaram um melhoramento a nível do rendimento e concretização de tarefas. Contudo, esses equipamentos funcionavam apenas com cargas não lineares que expuseram a rede eléctrica a uma “poluição” que as cargas lineares não expunham.

As perturbações da QEE advêm da utilização de cargas não lineares nos equipamentos usados nos sistemas eléctricos. Os equipamentos que utilizam cargas não lineares permitem o uso mais eficiente da electricidade e o controlo mais preciso sobre os processos, mas simultaneamente trouxeram perturbações muito significativas à QEE. Estas perturbações derivam do facto destas cargas consumirem correntes não sinusoidais e conseqüentemente introduzirem, na rede eléctrica, harmónicas.

A Figura 90 apresenta uma fonte de alimentação comutada, que é um exemplo de um sistema de carga não linear e que pode dar origem à forma de onda da corrente e tensão da Figura 91.

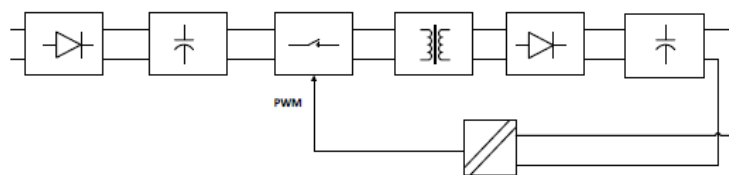


Figura 90 - Fonte de alimentação comutada.

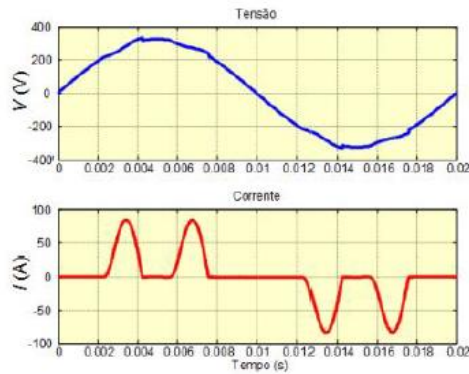


Figura 91 - Forma de onda da tensão e corrente de um sistema com carga não linear.

Contrariamente às cargas não lineares, os sistemas com cargas lineares são compostos por circuitos resistivos, capacitivos e indutivos. Estes quando alimentadas com uma tensão sinusoidal consomem correntes também sinusoidais e da mesma frequência. A Figura 92 a forma de onda da tensão e corrente de um sistema com carga linear.

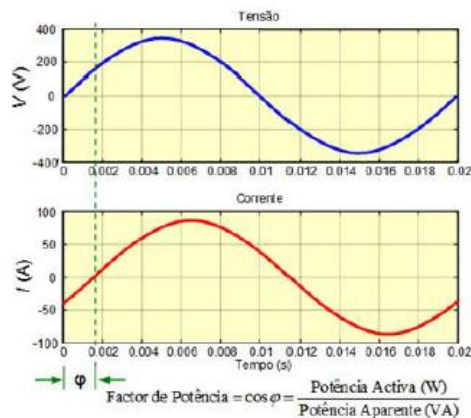


Figura 92 - Forma de onda da tensão e corrente de um sistema com carga linear.

4.2. As perturbações da QEE

O conceito QEE apresenta uma elevada preocupação para todos os agentes envolvidos no Sistema Eléctrico de Energia (SEE), desde a produção, transporte e distribuição, consumidores industriais, comerciais e residenciais. A degradação da QEE apresenta vastos problemas quando desconsiderados ou inculcados, conduzindo a inúmeros problemas, sendo estes, perda de produção, avaria de equipamentos, aumentos de custos com a energia e o aumento do risco da segurança pessoal. Para assegurar a qualidade da energia e minimizar estes problemas torna-se necessário monitorizar frequentemente, utilizando equipamentos necessários e utilizar procedimentos de manutenção adequados a cada equipamento. Na Figura 93 podemos verificar as zonas onde pode existir a degradação da QEE.

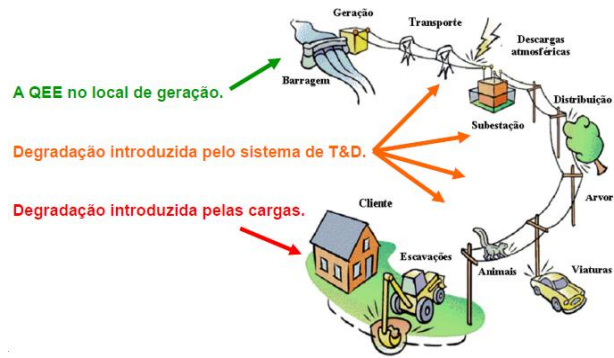


Figura 93 - Zonas de degradação da QEE no sistema eléctrico de energia.

As perturbações de QEE são divididas em 2 grupos: *eventos* e *variações*. Os *eventos* são perturbações rápidas com início e fim bem delimitados, como por exemplo as cavas de tensão, enquanto que as *variações* são perturbações em regime permanente que necessitam ou permitem medições contínuas, como é o caso da variação de frequência da rede eléctrica. Para a deteção de *eventos* são utilizados mecanismos de trigger, isto é, um evento é detetado quando o valor de um parâmetro ultrapassa um determinado valor predefinido [44]. Na Tabela 14 são apresentados os principais problemas de QEE que serão detalhados nos subcapítulos seguintes.

Tabela 14 - Principais problemas de Qualidade de Energia Elétrica [1][47].

Problemas de Qualidade de Energia Elétrica		
Transitórios	Impulsionais	
	Oscilatórios	Baixa frequência
		Média frequência
Alta frequência		
Variações de tensão	Curta duração	Cavas
		Sobretensões curtas
		Interrupções curtas
	Longa duração	Subtensões
		Sobretensões longas
		Interrupções longas
Distorção da forma de onda	Harmónicas	
	Inter-harmónicas	
	Micro-cortes	
	Ruído	
	Offset DC	
Flutuações de tensão		
Variações de frequência		
Desequilíbrios		

4.2.1 Transitórios

Os transitórios, conhecidos como transients na língua inglesa, são caracterizados como variações rápidas e de curta duração (menor que um ciclo da tensão de alimentação) que afetam a forma de onda. Podem ser divididos em dois tipos: transitórios impulsivos e transitórios oscilatórios. Os transitórios impulsivos apresentam menor duração e maior amplitude, comparativamente como os transitórios oscilatórios, e são causados por descargas atmosféricas, descargas electrostáticas, entre outros. Estes são caracterizados pelos seus tempos de subida e descida, para além da sua amplitude [47].

Na (Figura 94) é apresentado um exemplo de um transitório impulsional.

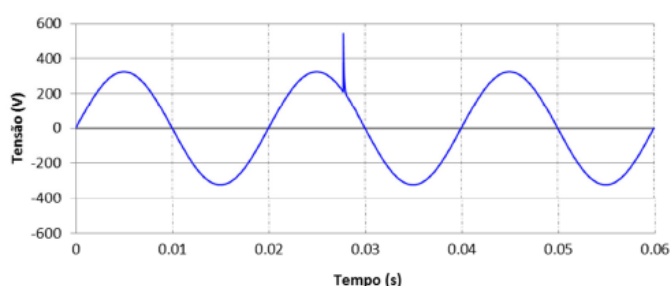


Figura 94 - Transitório impulsional.

Os transitórios oscilatórios são causados principalmente pela entrada em funcionamento de condensadores utilizados para correção do factor de potência, sendo caracterizados pela sua frequência de oscilação, amplitude e duração. Dependendo da frequência de oscilação do transitório, este pode ser classificado entre um dos 3 tipos: baixa frequência ($f < 5$ kHz), média frequência ($5 \text{ kHz} \leq f < 500$ kHz), e alta frequência ($500 \text{ kHz} \leq f < 5$ MHz). Na Figura 95 está representado um exemplo deste fenómeno.

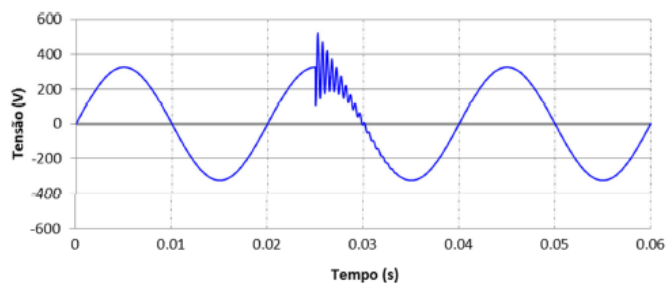


Figura 95 - Transitório oscilatório.

4.2.2 Interrupções

Como se pôde observar na Tabela 14 em cima, as variações de tensão são divididas em dois grupos: de curta duração e de longa duração. Tal como os seus nomes indicam, o que os distingue é a sua duração.

Segundo a norma NP EN 50160 [47], uma interrupção ocorre aquando uma descida do valor eficaz da tensão de alimentação até valores situados entre 0 e 1% do seu valor nominal. As interrupções classificadas consoante o tipo:

- interrupção prevista
- interrupção acidental

E classificadas consoante a duração:

- interrupções curtas (breves).
- interrupções longas.

Em alguns documentos, as interrupções breves são consideradas como tendo durações não excedendo 1 min. Algumas vezes os esquemas de controlo aplicados necessitam de tempos de operação até 3 min de forma a evitar interrupções longas da tensão. Conforme se mostra na Figura 96.

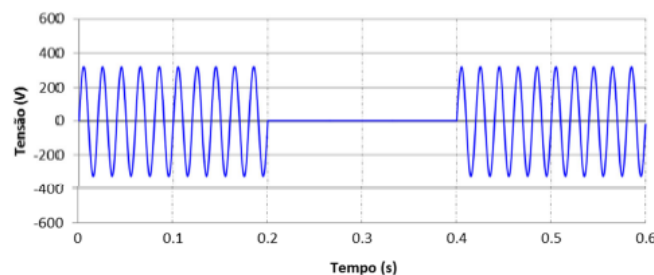


Figura 96 - Interrupção de curta duração.

As principais causas da ocorrência de interrupções com origem na instalação do consumidor são: falhas no isolamento de equipamentos, avarias em equipamentos e proteções dos equipamentos elétricos mal dimensionadas. As consequências da ocorrência de interrupções variam consoante a duração da interrupção e o tipo de equipamento afetado. As consequências agravam-se em equipamentos de tecnologia de informação e sistemas de controlo baseados em microprocessadores [48].

4.2.3 Cavas de Tensão

As cavas de tensão, ou sags na língua inglesa, consistem numa diminuição brusca da tensão de alimentação para valores que se situam entre 1% e 90% da tensão nominal, segundo a norma EN50160. seguida da retoma quase imediata da tensão original. Uma queda acima de 90% é

considerada como funcionamento normal e uma queda abaixo de 1% é considerada como uma interrupção [47]. A duração destas pode variar entre o tempo correspondente a meio ciclo da tensão de alimentação e 1 minuto. A Figura 97 ilustra a representação gráfica de uma cava de tensão.

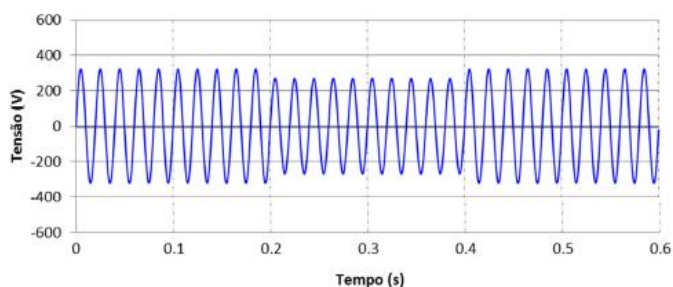


Figura 97 - Cava de tensão.

As causas para a ocorrência de cavas de tensão são, falhas na rede de distribuição, falhas nas instalações do consumidor ou ligação de cargas ou motores de elevada potência. As cavas de tensão podem levar ao mau funcionamento de:

- Equipamentos de tecnologia de informação, nomeadamente sistemas de controlo com base em microprocessadores, pode causar o disparo de contactos e relés eletromecânicos, pode levar à redução de eficiência ou paragem de máquinas de rotação elétrica, falha de sistemas PLC, relés e conversores de frequência.
- Accionamentos com variadores electrónicos de velocidade.
- Contactores
- Iluminação
- Transformadores

As cavas de tensão podem resultar em custos elevados, principalmente quando são afetados processos contínuos.

4.2.4 Subtensões

As subtensões são semelhantes às cavas de tensão, a diferença recai apenas na duração das mesmas, que se situa acima de 1 minuto. As principais causas deste fenómeno estão normalmente associadas a bancos de condensadores, posteriormente à sua desconexão da rede, e a sobrecargas[47].

4.2.5 Sobretensões

As sobretensões são divididas em dois grupos: sobretensões curtas e sobretensões longas (Conorme se mostra na Figura 98).

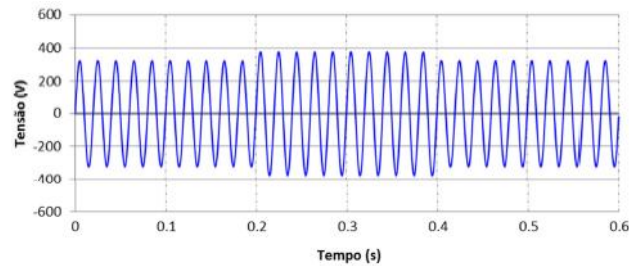


Figura 98 - Sobretensão de curta duração.

As sobretensões curtas, ou swells na língua inglesa, contrariamente às cavas de tensão, consistem num aumento de 10% ou mais sobre a tensão nominal. Para além disso, a duração máxima deste fenómeno terá de ser inferior a 3 minutos e superior a meio ciclo da tensão de alimentação. As sobretensões curtas devem-se habitualmente a manobras e defeitos, como por exemplo: deslastragem súbita de cargas, defeitos monofásicos e não linearidades. As sobretensões longas são semelhantes às sobretensões curtas, exceto na duração, em que esta terá de ser superior a 3 minutos.

As fontes de Sobretensões no Sistema Eléctrico (fornecedor):

- Comutação de Condensadores;
- Muito comuns na compensação do factor de potência;
- Amplificação devido a fenómenos de ressonância no sistema de energia.

E nas instalações do utilizador final:

- Dispositivos de electrónica de potência;
- Iluminação;
- Fenómenos de comutação de cargas.

Relativamente às principais causas de sobretensões longas, estas normalmente estão associadas à desconexão de cargas de elevada potência, mau dimensionamento de fontes de potência e mau regulamento de transformadores. As consequências das sobretensões incluem perda de dados, flickering e paragem ou danificação de equipamentos quando são atingidos valores de tensão muito elevados [47].

4.2.6 Flutuações de Tensão (Flicker)

Conceitualmente, as flutuações de tensão são definidas como variações repetitivas, e aleatórias na onda de tensão, provocadas pela operação de cargas com características de alterações rápidas e bruscas nas magnitudes da potência reactiva e activa. A normalização associada à QEE define as flutuações de tensão como,

“...variações repetitivas, aleatórias ou esporádicas do valor eficaz da tensão de fornecimento, provocadas pela operação de cargas capazes de produzir componentes de frequências inter-harmónicas nos sinais de tensão das redes de energia eléctrica ” (CENELEC, 2001).

A Figura 99 mostra a ocorrência de uma flutuação numa onda de tensão.

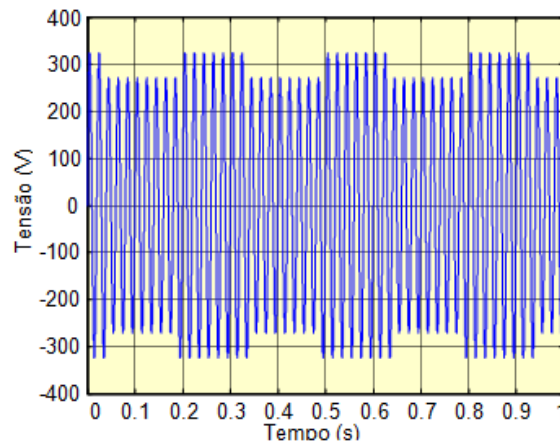


Figura 99 - Flutuação de tensão.

Associado ao fenómeno das flutuações de tensão, está o fenómeno de *tremulação (flicker)* que é a impressão de instabilidade da sensação visual provocada por um estímulo luminoso cuja luminância ou repartição espectral flutua no tempo.

A diferença entre uma flutuação de tensão e um *flicker* é o facto de um determinado sinal de tensão, que apresenta uma flutuação, não resulte forçosamente numa tremulação luminosa visível.

Os *flickers* podem ser classificados em quatro tipos, isto é, desde o tipo A ao tipo D.

Relativamente aos *flickers* do tipo A, estes apresentam degraus de tensão periódicos e de amplitude constante, cuja origem poderá ser a comutação periódica de cargas resistivas, ou de aparelhos de soldadura. No que diz respeito à ocorrência de *flickers* do tipo B, a variação da tensão apresenta uma série de degraus irregulares com amplitudes máximas e mínimas iguais ou não. Os *flickers* do tipo C apresentam flutuações de tensão bem separadas, cuja origem pode estar na ligação de cargas não resistivas, como por exemplo motores eléctricos. Por último os *flickers* do tipo D apresentam flutuações aleatórias contínuas cuja origem são cargas que apresentam variações rápidas nas suas condições de funcionamento, como por exemplo os fornos de arco. A Figura 100 mostra a variação da tensão realizada por um *flicker* dos todo tipos.

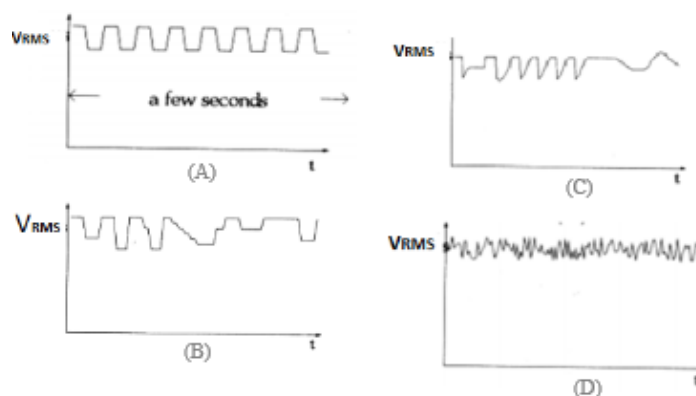


Figura 100 - Variação da tensão provocada por flicker dos tipos A, B,C,D

As flutuações de tensão são provocadas por cargas de grande potência, e com regimes de funcionamento instáveis. Alguns equipamentos que podem dar origem a flutuações de grande ou pequena amplitude, são os fornos de arco, aparelhos de soldar e outros equipamentos como máquinas de raios-X, fotocopiadoras, impressoras laser de grande capacidade, bombas de calor, fornos, microondas, máquinas de lavar e secar roupa e termoacumuladores.

Os fornos de arco utilizam a energia fornecida para aquecer matérias a alta temperatura existindo fornos de arco AC e DC. Os fornos alimentados a DC podem controlar o arco de uma melhor forma e reduzir o efeito de *flicker*, mas introduzem mais harmónicas na rede devido ao rectificador. Como o arco é altamente instável este tipo de equipamento introduz na rede muitas perturbações, como por exemplo variações significativas na tensão nas redes T&D (EDP, 2005).

As principais consequências nos sistemas eléctricos, resultantes das variações causadas pelos equipamentos de grande potência são a instabilidade da potência e binário das máquinas eléctricas, a queda de rendimento dos equipamentos eléctricos, a interferência nos sistemas de protecção e o efeito *flicker* nas lâmpadas.

Podem ser implementadas várias estratégias de modo a mitigar a ocorrência das flutuações de tensão. Estas estratégias passam pelo aumento da potência de curto-circuito e pela diminuição da energia reactiva.

4.2.7 Variações de Frequência

As variações de frequência são definidas como variações da frequência fundamental do sistema eléctrico relativamente ao seu valor nominal. O valor dessa frequência está directamente relacionado com a velocidade de rotação dos geradores que fornecem a energia à rede eléctrica. Como os consumos estão sempre a variar, é natural haver variações na frequência da rede, e, dependendo do grau de variação dos consumos, das próprias características das cargas e principalmente da

velocidade de resposta do sistema de controlo de geração de energia, o desvio relativo à frequência nominal poderá ser maior ou menor. Atualmente é muito raro haver problemas de variações de frequência significativas, a não ser que se trate de uma rede elétrica isolada [47]. A norma NP/EN50160 especifica que, durante 95% do tempo numa semana, as variações de frequência não devem exceder 1%.

4.2.8 Desequilíbrios

O *desequilíbrio de tensões* caracteriza-se pela variação das tensões de um sistema trifásico de modo a que as amplitudes das tensões de fase e/ou os desfasamentos entre elas não sejam iguais, tal como indicam os gráficos da Figura 101.

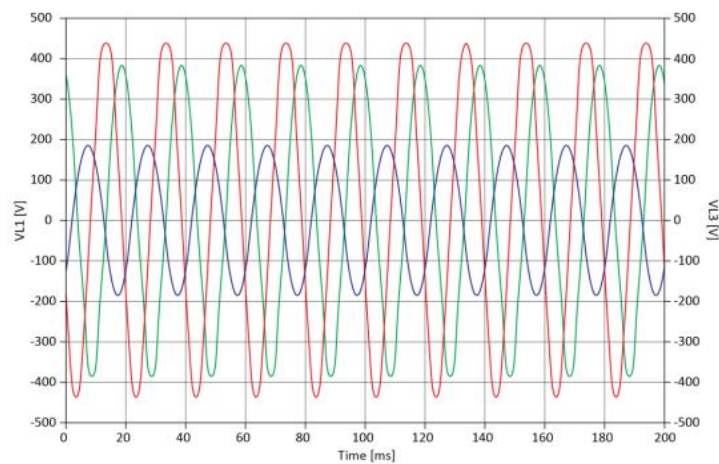


Figura 101 - Um exemplo de desequilíbrio de tensões num sistema trifásico [LeonardoEnergy, 2013].

A Figura 102 mostra as tensões de Figura 101 como vectores. Note-se que o ângulo entre os vectores não é de 120° .

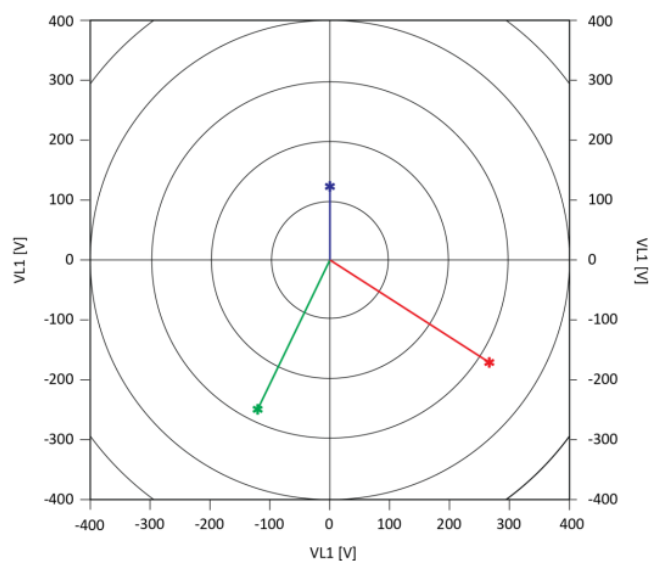


Figura 102 - Ilustração das tensões da Figura 108 como vectores [LeonardoEnergy, 2013].

Um dos métodos utilizados para determinar o factor de desequilíbrio (τ), envolve o cálculo das componentes simétricas de sequência positiva V_+ e negativa V_- sendo ambas calculadas da seguinte forma [49]:

$$\dot{V}_+ = \frac{(\dot{V}_a + a\dot{V}_b + a^2\dot{V}_c)}{3}$$

$$\dot{V}_- = \frac{(\dot{V}_a + a^2\dot{V}_b + a\dot{V}_c)}{3}$$

Onde $a = e^{j2\pi/3}$ e V_a, V_b, V_c representam os fasores das tensões simples de cada linha. A razão entre o módulo da componente de sequência negativa e o módulo da componente de sequência positiva permite então obter o grau de desequilíbrio em percentagem, tal como se pode observar na seguinte equação:

$$\tau_{\%} = \frac{|\dot{V}_-|}{|\dot{V}_+|} 100\%$$

Este problema de qualidade de energia é causado pela ligação de grandes cargas monofásicas em média e alta tensão ou pela má distribuição de cargas monofásicas pelas três fases da rede de BT. As instalações de produção de energia descentralizada também podem causar desequilíbrio nos sistemas trifásicos.

O desequilíbrio de tensões tem efeitos negativos na performance de equipamentos trifásicos como motores de indução e transformadores causando perdas e vibrações. Equipamentos eletrónicos como retificadores ou inversores produzem elevado conteúdo harmónico na presença de desequilíbrio de tensões[50].

4.2.9 Distorção harmónica

Entende-se por harmónicas as tensões ou correntes com frequências múltiplas inteiras da componente fundamental, 50 Hz, que se classificam quanto à ordem, frequência e sequência.

A ordem de uma harmónica está relacionada com o múltiplo da frequência fundamental, se uma harmónica tem ordem quatro este apresenta uma frequência quatro vezes superior à frequência fundamental (f_0). No caso de $f_0 = 50\text{Hz}$, então a harmónica de ordem 4ª será de 200 Hz. Para melhor compreendermos o relacionamento entre a ordem do harmónico e a frequência fundamental podemos observar a Tabela 15 que contém a classificação de harmónicas.

Tabela 15 - Classificação das harmónicas [EDP, 2005].

Ordem	Fundamental	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	...	n
f (Hz)	50	100	150	200	250	300	350	400	...	nx50
Sêquencia	+	-	0	+	-	0	+	-

A sequência está relacionada com o sentido de rotação do campo girante, criado pela harmónica respectiva, relativamente ao campo girante induzido pela componente fundamental. Isto é particularmente importante nos motores de indução, uma vez que as *harmónicas de sequência direta* (+) induzem campos magnéticos que giram no sentido do campo magnético fundamental, sendo constituídos por três fasores de igual módulo e desfasados de 120° entre eles. As *harmónicas de sequência inversa* (-) induzem campos magnéticos que giram no sentido oposto ao do campo magnético fundamental, dando origem a um binário oponente. As *harmónicas de sequência homopolar* (0) induzem campos magnéticos de resultante nula. São constituídos por três fasores de igual módulo e não desfasados, com igual direção, provocando assim o aumento da corrente do neutro, para o triplo da amplitude das fases. Estes harmónicas são os múltiplos de 3 (3°, 9°, 15°, etc.). As harmónicas de sequência nula são, de facto, aqueles que mais preocupam numa instalação, por levarem ao aumento da corrente do neutro, originando problemas tanto na instalação como nos equipamentos existentes. Por esse motivo a secção do cabo do neutro pode ser inferior à dos outros cabos. Isso agrava ainda mais o problema das harmónicas de 3ª ordem, podendo estes, causar sérios danos nas instalações. Outro aspecto a ter em conta, é que, havendo uma corrente elevada no neutro, as quedas de tensão nas reactâncias do cabo, principalmente em caso deste ser longo, podem-se tornar bastante significativas. As harmónicas de sequência zero, são normalmente produzidos, por cargas não lineares ligadas entre fase e neutro, como é o caso dos computadores e balastos electrónicos para lâmpadas, como tais os LEDs.

A distorção harmónica de uma forma de onda quantifica a respectiva deformação ao longo de cada ciclo da frequência fundamental. A Figura 103 ilustra a onda de tensão com uma distorção harmónica.

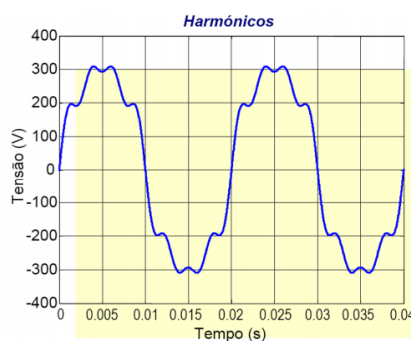


Figura 103 - Distorção harmónica numa onda de tensão [EDP, 2005].

A quantificação da distorção harmónica tem associado o conceito de taxa de distorção harmónica THD. Esta calcula-se através do quociente entre o valor eficaz das componentes harmónicas e o valor eficaz total do sinal, conforme se mostra a equação:

$$THD\% = \frac{\sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots + H_n^2}}{H_1} \times 100$$

4.3. Normas associadas à qualidade de energia eléctrica

Estima-se que em países industrializados cerca de 50 a 60% de toda a potência eléctrica flui através de um qualquer equipamento de electrónica de potência, originando por isso eventuais problemas de qualidade de energia eléctrica. E esta percentagem tem vindo sempre a aumentar.

Para combater o aumento da “poluição” electromagnética, organizações como a CEI–Comissão Electrotécnica Internacional (IEC – International Electrotechnical Commission) e o IEEE – Instituto dos Engenheiros Electrotécnicos e Electrónicos - tem elaborado normas visando limitar os conteúdos harmónicos nos sistemas eléctricos. Ao mesmo tempo, fabricantes e utilizadores de equipamentos de electrónica de potência têm vindo a desenvolver soluções para os problemas existentes.

De acordo com a norma portuguesa de energia NP 45020: 2001, a normalização permite determinar um conjunto de regras com vista a obter o bom funcionamento de um processo, satisfazendo as exigências do consumidor e protegendo os interesses de todas as partes interessadas.

“A Normalização é a actividade destinada a estabelecer, face a problemas reais ou potenciais, disposições para utilização comum e repetida, tendo em vista a obtenção do grau óptimo de ordem, num determinado contexto. Consiste, em particular, na elaboração, publicação e promoção do emprego das normas” [CENELEC, 2001].

A utilização de normas permite assim a comunicação entre todas as partes interessadas, simplificando a coordenação e organização de processos. Isto só é possível através da participação de entidades reguladoras, que formalizam e concretizam a normalização de meios de apoio ao cumprimento das normas, podendo estes meios ser técnicos, humanos e outros meios que sejam necessário à sua execução. Na Figura 104, podemos verificar a parâmetros associados à normalização, nomeadamente as entidades reguladoras, as normas a ser implementadas e os meios para o seu cumprimento.

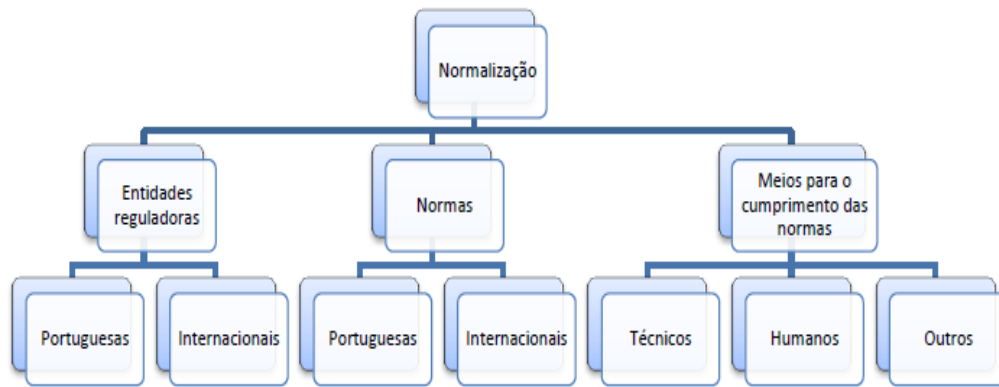


Figura 104 - Parâmetros utilizados na concretização de uma normalização [ISEP, 2013].

Nos subcapítulos seguintes serão apresentados todos os parâmetros relacionados com a normalização da QEE, as entidades reguladoras, portuguesas e internacionais, as normas relacionadas com a implementação deste trabalho e os meios de cumprimento das normas.

4.4.1 Entidades reguladoras

As entidades reguladoras são organizações com o objectivo prestar auxílio, a uma determinada actividade de um sector, acompanhando a implementação das regras impostas por si ou por entidades governamentais. Algumas dessas estruturas têm também funções de fiscalização do mercado e do respectivo modo de funcionamento. O desenvolvimento das funções de regulação realizadas pelas entidades reguladoras permite a obtenção benefícios aos consumidores e a sua integração no funcionamento e estratégia adoptadas pelas entidades reguladoras.

No contexto deste trabalho serão apresentadas, nos subcapítulos seguinte, as entidades reguladoras portuguesas e internacionais, responsáveis pelas normas inerentes à QEE. Nomeadamente, a International Electrotechnical Commission (IEC), o Comité Europeu de Normalização Electrotécnica (CENELEC), o Sistema Eléctrico Nacional (SEN) e a Entidade Reguladora de Serviços Energéticos (ERSE). A Figura 105 mostra as entidades reguladoras e o modo como prestam apoio à normalização associada à QEE.

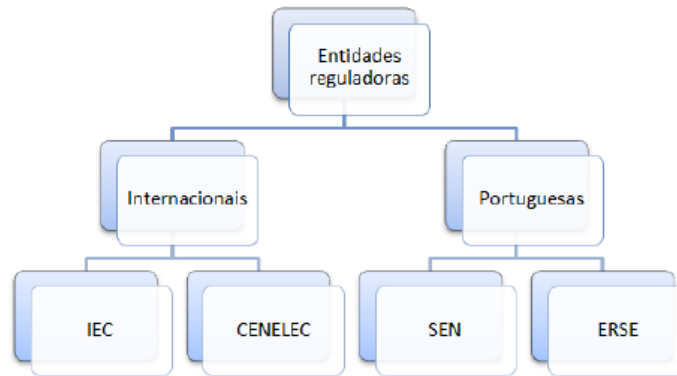


Figura 105 - Entidades reguladoras internacionais e portuguesas associadas à normalização da QEE [ISEP, 2013].

Posteriormente serão expostas as normas de energia utilizadas na realização deste trabalho.

4.4.2 Normas de energia

As normas de energia usam, entre outras formas de comunicação, a linguagem não-verbal ou semi-verbal e desta forma, a sua terminologia assume-se como uma tarefa fundamental em toda a sua actividade. O facto de uma norma ser publicada em vários idiomas é da maior importância na compreensão de textos e das terminologias e definições nela inserida.

No contexto a elaboração deste trabalho, serão expostos dois grupos de normas:

- Normas nacionais (RQS e EN 50160).
- Normas internacionais (IEC 61000-4-3, IEC 61000-4-7).

A Figura 106 mostra quais as normas nacionais e internacionais que vão ser expostas de seguida.

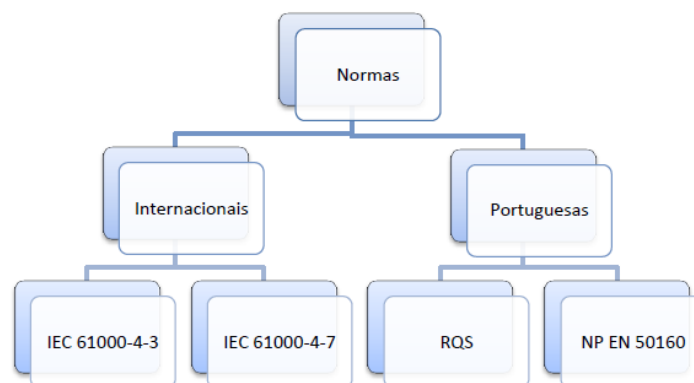


Figura 106 - Normalização da QEE, internacionais e portuguesas [ISEP, 2013].

4.4.2.1 Normas portuguesas

As normas nacionais são normas técnicas estabelecidas por organismos nacionais, ou que adoptem normas europeias, no âmbito da energia eléctrica. Associadas à implementação deste trabalho, estão o RQS, aplicado pela ERSE e a norma NP 50160, adoptada de uma norma europeia realizada pelo CENELEC.

Regulamento de Qualidade de serviço

O RQS tem um objectivo de estabelecer um plano de qualidade, através da monitorização, para os serviços de abastecimento de energia eléctrica prestados pelas entidades do SEN, relativamente aos seguintes aspectos:

- Continuidade de serviço.
- Qualidade de onda de tensão.
- Qualidade de serviço comercial.

No que respeita à *continuidade de serviço*, esta pretende caracterizar a fornecimento adequado de energia através do número e duração das interrupções do fornecimento. Para além dos indicadores gerais aplicados às redes de transporte e de distribuição, o RQS determina padrões de continuidade de serviço, cujo incumprimento resulta no pagamento de coimas por parte dos operadores das redes em causa.

A *qualidade da onda tensão* é caracterizada através dos parâmetros directamente associadas tais como a amplitude, a frequência, a forma da onda e a simetria do sistema trifásico da tensão.

Por último, a *qualidade de serviço* comercial, fornecida aos clientes pelas empresas distribuidoras, quer sejam operadores de rede ou comercializadores, inclui factores tais a rapidez de atendimento, a resposta a diversos pedidos, a leitura de contadores ou a avaliação da satisfação dos clientes.

A regulação de todos estes aspectos é realizada com o auxílio de indicadores e padrões, estabelecidos no RQS e avaliados periodicamente pela ERSE. O Decreto-Lei nº48, de 8 de Março de 2006, define o RQS como,

“O presente Regulamento estabelece os padrões mínimos de qualidade, de natureza técnica e comercial, a que deve obedecer o serviço prestado pelas entidades do Sistema Eléctrico Nacional (SEN) de Portugal continental.” (Diário da República, 2006)

De acordo com o Artigo 2º, patente no RQS, estão abrangidas pelas disposições deste regulamento, os operadores da rede de transporte, os operadores das redes de distribuição, os comercializadores

de último recurso e os comercializadores regulados, os comercializadores, os agentes externos, os clientes e os produtores com instalações ligadas à rede de transporte e às redes de distribuição.

Os padrões acessíveis neste regulamento definem os níveis de serviço para o número e duração de interrupções de fornecimento, as características técnicas da tensão, o atendimento telefónico e presencial, a resposta a reclamações e pedidos de informação, a leitura de equipamentos de medição, prazos de religação do fornecimento, o horário de visitas técnicas e o prazo para execução de orçamentos e ramais de ligação à rede. Assim, tendo em vista estes aspectos, os modelos de qualidade de serviço variam com as zonas geográficas. A Tabela 16 mostra a classificação das zonas de implementação dos padrões de qualidade de serviço de acordo com o RQS.

Tabela 16 - Classificação das zonas de implementação dos padrões de qualidade de serviço, de acordo com o RQS [ERSE, 2009].

Zona A	Capitais de distrito e localidades com mais que 25000 habitantes
Zona B	Localidades com número de clientes compreendidos entre 2500 e 25 0000
Zona C	Restantes locais

É da responsabilidade das entidades do SEN, implementar os respectivos sistemas de registo e monitorização, apresentando posteriormente um plano anual de monitorização e o atendimento de reclamações do cliente, independentemente de qualquer que seja a origem do problema. De acordo com os padrões definidos pelo RQS, a violação de padrões individuais da continuidade de serviço ou da qualidade comercial, desde que não resultando de situações fortuitas ou de força maior, de razões de interesse público, de razões de serviço, de razões de segurança, ou de facto imputável ao cliente ou por acordo com este, dá direito ao cliente a uma receber uma compensação, paga de forma automática, nos prazos estabelecidos, sem carecer de reclamação.

O RQS encontra-se actualmente revisto e em vigor desde 8 de Março de 2005, através do Despacho n.º 5255/2006 (Diário da República, 2006).

No âmbito da Comunidade Europeia, no sentido da harmonização da legislação sem a qual ficaria afectada a livre troca de bens e serviços, várias directivas foram publicadas tendentes a eliminar as diferenças na legislação dos diferentes estados. Uma dessas directivas é a Directiva de Conselho n.º 85/374 sobre responsabilidade por produtos defeituosos. O seu Art.º 2º define a electricidade como um produto, e como tal tornou-se necessário definir as suas características, o que originou a norma europeia EN 50160.

Norma NP/EN 50160

“Características da Tensão Fornecida pelas Redes Públicas de Distribuição” – Esta norma, publicada pelo CÉNÉLEC (Comité Europeu de Normalização Electrotécnica), define, no ponto de fornecimento ao consumidor PCC, as características principais da tensão para as redes públicas de abastecimento de energia em BT e MT, tais como: frequência, amplitude, forma de onda, cavas de tensão, sobretensões, harmónicas e inter-harmónicas de tensão, simetria das tensões trifásicas, transmissão de sinais de informação pelas redes de energia [52].

Para as redes de BT, relativamente aas harmónicas de tensão, nas conduções normais de exploração, durante o período de uma semana, 95% dos valores eficazes de cada harmónica de tensão (valores médios em cada 10 minutos), não devem ultrapassar os valores indicados na Tabela17 em baixo.

Além disso, esta norma especifica que a taxa de distorção harmónica total da tensão fornecida (tendo em conta as primeiras 40 harmónicas) não deverá ultrapassar 8%.

Tabela 17 - Valores dos primeiros 25 harmónicas de tensão nos pontos de fornecimento, expressos em percentagem da tensão nominal UN. [Fonte:NP/EN50160]

Harmónicas ímpares				Harmónicas pares	
Não múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Ordem n	Tensão relativa (%)	Ordem n	Tensão relativa (%)	Ordem n	Tensão relativa (%)
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6 - 24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Nota: Os valores correspondentes aas harmónicas de ordem superior a 25, por serem geralmente baixos e muito imprevisíveis (devido aas efeitos de ressonância), não são indicados nesta Tabela

Para as redes de média tensão aplica-se a mesma Tabela, com a observação de que o valor do harmónico de ordem 3, dependendo da concepção da rede, pode ser muito mais baixo.

Relativamente aas níveis de tensão, a norma NP 50160 define BT como a sendo a tensão utilizada para o fornecimento de energia eléctrica cujo valor eficaz nominal tenha o limite máximo de 1kV,

e MT como a tensão utilizada para o fornecimento de energia eléctrica cujo valor eficaz nominal seja superior a 1kV e não superior a 35 kV. Em qualquer dos casos, a frequência injectada na rede deve ser igual a 50 Hz, podendo estar compreendida entre os seguintes intervalos de valores

- $\pm 1\%$ durante 99.5% de um ano.
- +4% ou -6% durante 100% do tempo.

A norma portuguesa define ainda os limites ou valores característicos da tensão que um cliente tem direito a esperar, não descrevendo a situação típica de uma ligação a uma rede de distribuição pública. Inclui-se ainda nesta norma, a descrição de grandezas e conceitos referentes não só a perturbações da QEE mas também à produção de energia. Assim, são descritos os conceitos relativos a flutuações de tensão, variações rápidas da tensão, variações da tensão, tremulações, severidade da tremulação, cavas de tensão, interrupções, sobretensões temporárias, sobretensões transitórias, tensões harmónicas e inter-harmónicas e desequilíbrios na tensão.

4.4.2.2 Normas internacionais

As organizações internacionais de normalização utilizam uma participação aberta através da cooperação de todos os organismos de normalização nacionais existentes no mundo. As normas internacionais são normas técnicas estabelecidas por um organismo internacional de normalização para aplicação em âmbito mundiais. Entre as principais normas internacionais vão ser citadas, as normas IEC 61000-4-3 e IEC 61000-4-7.

IEC 61000

O conjunto de normas IEC 61000 estabelece padrões relativamente à *Electromagnetic Compability* (EMC), que incluem a terminologia, descrições de fenómenos electromagnéticos, técnicas de medição e testes e orientações sobre instalação e mitigação. Este conjunto de normas está dividido nas seguintes seis partes, IEC 61000-x-x, sendo elas:

- IEC 61000-1-x, generalidades,
- IEC 61000-2-x, ambiente electromagnético.
- IEC 61000-3-x, limites.
- IEC 61000-4-x, técnicas de teste e medida.
- IEC 61000-5-x, linhas de orientação.
- IEC 61000-6-x, diversos.

As normas IEC 61000-1	compreendem considerações gerais da QEE, terminologias, definições, etc.
As normas IEC 61000-2	definem as condições electromagnéticas para a instalação do equipamento e o nível de compatibilidade entre o equipamento e o ambiente em que se encontra.
As normas IEC 61000-3	explicam os limites de perturbações permitidos pelos equipamentos ligados à rede de energia e os limites de imunidade.
As normas IEC 61000-4	fornece uma directriz sobre técnicas e métodos para a realização de medidas e avaliação de conformidade entre o equipamento e o ambiente.
As normas IEC 61000-5	fornece linhas de orientação para instalações e mitigação de problemas que abrangem também sugestões acerca da instalação de equipamentos.
As normas IEC 61000-6	fornece os níveis de imunidade às perturbações electromagnéticas que um equipamento deve possuir.

Para a elaboração deste trabalho, salienta-se o uso das normas IEC 61000-2-2 , IEC 61000-2-4 , IEC 61000-3-2 , IEC 61000-4-7 e IEC 61000-4-30. Estas, vão ser abordadas de seguida. E por fim vai ser abordada a norma IEEE 519-1992.

➤ **IEC 61000-2-2**

A norma IEC 61000-2-2 define os níveis de compatibilidade para as harmónicas de tensão para redes de baixa-tensão, de acordo com a Tabela 18.

Tabela 18 - Níveis de compatibilidade para as harmónicas de tensão em redes públicas de BT.

Harmónicas ímpares				Harmónicas pares	
Não múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Ordem n	Tensão relativa (%)	Ordem n	Tensão relativa (%)	Ordem n	Tensão relativa (%)
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3,0	21	0,2	8	0,5
17	2,0	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	$0,2 + 0,5 \times 25/n$				

➤ IEC 61000-2-4

A norma IEC 61000-2-4 estabelece os níveis de compatibilidade para redes industriais (Tabela 19). Definem-se 3 classes com exigência de compatibilidade diferentes em função dos ambientes electromagnéticos possíveis:

Tabela 19 - Níveis de compatibilidade para harmónicas.

	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Distorção harmónica total	5%	8%	10%

Classe 1 – Aplica-se a redes protegidas e tem níveis de compatibilidade mais baixos do que os das redes públicas. Diz respeito à utilização de aparelhos muito sensíveis às perturbações da rede eléctrica, como por exemplo: instrumentação de laboratórios tecnológicos, certos equipamentos de automação e de protecção, certos computadores, etc.

Classe 2 – Esta classe aplica-se aos PAC (Ponto de Acoplamento Comum à rede pública) e aos pontos de ligação interna nos ambientes industriais em geral. Os níveis de compatibilidade desta classe são idênticos aos das redes públicas, pelo que os equipamentos destinados à utilização nestas redes podem ser usados nesta classe de ambiente industrial.

Classe 3 – Esta classe aplica-se somente aos pontos de ligação interna dos ambientes industriais. Os níveis de compatibilidade são superiores aos da classe 2 para certas perturbações. Esta classe deve ser considerada, por exemplo, quando uma das seguintes condições é satisfeita: a maior parte das cargas são alimentadas através de conversores; existem máquinas de soldar; ocorrem arranques (partidas) frequentes de motores de grande potência; as cargas variam rapidamente.

Refira-se que os limites máximos individuais das harmónicas de tensão e a taxa de distorção total impostos pela norma europeia NP/EN 50160 coincidem com os valores das normas IEC 61000-2-2 e 61000-2-4, classe 2 para ambientes industriais.

➤ IEC 61000-3-2

Como base para a especificação de qualquer material ou equipamento, sugere-se buscar informações prioritariamente nas normativas oficiais publicadas por organismos regulamentadores. Caso não existam normas para um determinado equipamento, como ainda é o caso das luminárias com LED's e dos economizadores, alguns cuidados, mencionados a seguir, devem ser tomados para minimizar a possibilidade de aquisição de produtos de baixa qualidade no que tange a pelo menos seu desempenho eléctrico, o que pode acarretar em problemas na rede eléctrica na qual estarão

instalados, comprometendo inclusive o funcionamento de outros equipamentos conectados à mesma rede.

Na ausência de uma normativa efetiva, o desempenho funcional de equipamentos de iluminação pública podem ser estudados a partir de testes de durabilidade, em campo ou que simulem as reais condições de operação. Já a verificação do desempenho elétrico deve ser feita avaliando no mínimo dois parâmetros básicos: a THDi e o factor de potência FP.

O primeiro parâmetro a ser verificado é o THDi, apresentado em 2.5.3. A propagação de uma corrente com elevada THDi na rede elétrica pode afetar o funcionamento de outros equipamentos conectados ao sistema, especialmente os de características eletrônicas e de precisão, próximos a fonte de distorção através de interferências eletromagnéticas ou ainda por ruídos propagados por condução.

Há também a possibilidade de as capacitâncias e indutâncias presentes na rede formarem circuitos ressonantes nas frequências das componentes harmônicas da corrente distorcida, gerando picos de corrente e sobretensões prejudicando outros componentes do sistema elétrico. Portanto, recomenda-se, que medida no ponto de entrega, a THDi consumida pelo equipamento não seja superior a 33% de sua componente fundamental (60Hz). Esta recomendação é uma adaptação do critério estabelecido na IEC 61000-3-2:2005, e deve ser verificada para todos os valores de tensão de alimentação especificados pelos seus respectivos fabricantes ou fornecedores. Também é possível utilizar diretamente a Tabela de referência para os equipamentos de iluminação, constante na norma supracitada, em que são limitados os valores de THDi para cada ordem específica de harmônico gerado, haja visto que cada componente harmônica tem seu efeito particular e indesejável na rede elétrica. Conforme se mostram na Tabela 20.

Tabela 20 - Limites para distorção harmônica da corrente.

[Fonte: adaptado da norma IEC 61000-3-2 (2005)]

Ordem da componente harmônica (n)	Máximo valor eficaz da componente harmônica da corrente expresso em termos percentuais (%) da componente fundamental (60Hz)
2	2
3	30 x FP*
5	10
7	7
9	5
11 ≤ n ≤ 39 (apenas as harmônicas ímpares)	3

* O máximo valor admitido é trinta multiplicado pelo factor de potência absoluto da carga, que pode assumir valores entre zero e um.

Nota: a composição deste valores, considerando um factor de potência de 0,92, resulta em uma THDi máxima de 33%.

O segundo parâmetro que se deve verificar é o factor de potência (FP). Assim sendo, medido no ponto de entrega, o factor de potência do equipamento não pode ser inferior a 0,92, conforme a Entidade Reguladora de Serviços Energéticos (ERSE), e deve ser verificado para todos os valores de tensão de alimentação especificados pelos seus respectivos fabricantes ou fornecedores.

Como se trata de equipamentos de características eletroeletrónicas, a verificação do factor de potência só será eficaz se a medição for realizada utilizando analisadores de qualidade de energia, pois a medição tradicional deste parâmetro, que avalia apenas o ângulo de defasamento entre a tensão e a corrente, desconsidera o efeito das distorções harmónicas (THDi). Além disto, a verificação de ambos os parâmetros deve ser feita em laboratórios independentes.

➤ **IEC 61000-4-30**

A norma IEC 61000-4-30 define os métodos de medição e interpretação de resultados provenientes da qualidade de energia em redes com frequência igual a 50Hz ou 60 Hz. Os padrões apresentados nesta norma esclarecem métodos de medição e interpretação de alguns parâmetros, nomeadamente, a amplitude da tensão de alimentação, interrupções de tensão, tremulações (*flickers*), cavas de tensão, transitórios de tensões, desequilíbrios de tensão, harmónicas de tensão e corrente, e inter-harmónicas e rápidas mudanças de tensão. Também presentes, neste conjunto de normas estão as classes de desempenho e medição, sendo estas:

- Classe de desempenho e medição A.
- Classe de desempenho e medição B.

A *classe de desempenho A* é usada quando são necessárias medições precisas, utilizando características específicas tais como, largura de banda e taxa de amostragem associadas à incerteza especificada para cada parâmetro.

A *classe de desempenho B* é utilizada em levantamentos estatísticos, resolução de problemas, e outras aplicações em que a incerteza é baixa e não é necessária.

Para cada classe de desempenho existe um conjunto de factores que deverão ser cumpridos. Cabe ao utilizador do equipamento seleccionar a classe de medição de desempenho, tendo em conta a aplicação do equipamento (IEC, 2003).

➤ IEC 61000-4-7

A norma IEC 61000-4-7 contém informação sobre a EMC, relativa a técnicas de teste e medição, medições e instrumentação de harmónicas e inter-harmónicas em sistemas de fornecimento de energia e equipamentos conectados a estes. Define ainda, os métodos de medição destinados a componentes espectrais com frequências acima de 9 kHz, que se sobrepõem à frequência fundamental em sistemas de alimentação com frequência igual a 50 Hz e 60 Hz (IEC).

Neste modelo, estão referenciados os instrumentos de medição destinados a medir grandezas individuais de equipamentos, de acordo com os limites de emissão em certos padrões, bem como os instrumentos para medição de harmónicas de corrente em sistemas de alimentação.

Os padrões de interpretação, relativamente a fenómenos provenientes dos sistemas de abastecimento de energia, sendo estes, harmónicas e inter-harmónicas, são definidos através da transformada de *Discret Fourier Transform* (DFT). Esta produz resultados precisos somente para sinais estacionários sendo que os sinais cuja amplitude varie com o tempo não podem ser correctamente descritos pelas componentes harmónicas.

A norma IEC 61000-4-7 esclarece ainda o novo modelo de instrumentação que determina a utilização de algoritmo rápido chamado *Fast Fourier Transform* (FFT) associada à DFT. Tal como a norma IEC 61000-4-30, a norma IEC 61000-4-7 define duas classes de precisão e instrumentação, Classe I e Classe II, que permitem a utilização de instrumentos simples e de baixo custo, de acordo com os requisitos da aplicação.

Norma ANSI/IEEE 519 – 1992

De acordo com esta norma, as empresas distribuidoras são responsáveis pela manutenção da qualidade da tensão em todos os seus sistemas [53].

- A norma estipula os limites de THDv e IHDv para os diferentes níveis de tensão a observar nas redes eléctricas, de acordo com a Tabela 21.

Tabela 21 - Limites máximos de distorção.

Tensão nominal no PAC (Un)	Distorção harmónica individual (%)	Distorção harmónica total (%)
Un ≤ 69 kV	3,0	5,0
69 kV < Un ≤ 161 kV	1,5	2,5
Un > 161 kV	1,0	1,5

- Os limites de IHDi do sistema de distribuição (120V a 69000V) são mostradas na Tabela 22. Obviamente, quanto maior for a corrente de curto-circuito (Isc) em relação à corrente de carga I_L, maiores serão as distorções de corrente admissíveis, uma vez que elas distorcerão em menor intensidade a tensão no PAC. À medida que se eleva o nível de tensão, menores são os limites aceitáveis.

Tabela 22 - Os limites de % IHDi do sistema de distribuição (120V a 69000V)

% Distorção harmônica individual de corrente						
$\frac{I_{SC}}{I_L}$	<11	11 < h < 17	17 < h < 23	23 < h < 35	35 ≥ h	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

I_{SC} corrente máxima de curto-circuito no PCC.

I_L corrente de demanda máxima (componente fundamental da frequência) no PCC.

As Harmônicas características (h) em relação ao número de pulsos (n) de um retificador é dado por:

$$h = (n \times p) \pm 1$$

onde: p = número inteiro (1,2,3,...) por exemplo: retificador 6 pulsos injeta:

$h = (1 \times 6) \pm 1 \Rightarrow$ harmônicas de 5^a & 7^a ordem

$h = (2 \times 6) \pm 1 \Rightarrow$ harmônicas de 11^a & 13^a ordem

5. Eficiência Energética na IP - políticas e estratégias

O consumo de energia está na origem de 80% das emissões de gases com efeito de estufa na União Europeia (UE). Consequentemente, reduzir as emissões de gases com efeito de estufa implica um menor consumo de energia e uma maior utilização de energia limpa. No caso da diminuição do consumo total de energia elétrica devem identificar-se alguns factores essenciais: O aparecimento de uma crise financeira e consequente contração económica que leva a um esforço na redução de gastos, aliando-se também uma crescente consciencialização para a disponibilidade de equipamentos com melhores níveis de eficiência, permitindo manter os níveis de conforto mas obtendo uma redução do consumo com consequências positivas ambiental e financeiramente. A Figura 107 mostra-se o conceito.



Figura 107 - ilustração do mecanismo de controlo de consumo energia elétrica.

É nesta óptica que surge a lançada na 3 de Março de 2010 a Estratégia Europa 20-20-20 para 2020 com o objectivo global de reduzir 20% do consumo de energia, reduzir 20% das emissões de GEE (Gases com Efeito de Estufa) e que 20% da energia consumida seja de fonte renovável. A nível nacional, conheça os principais documentos programáticos [NEEAP 2014], estudos enquadradores e de aprofundamento e documentos informativos de divulgação mais alargada pelas resoluções do Conselho de Ministros são mostradas na Figura 108.



Figura 108 - Cronograma de estratégias nacionais para a eficiência energética.

5.1. Classificação das vias e níveis mínimos de referência

Para estabelecer as condições adequadas de iluminação deverá ser utilizado o método simplificado preconizado na International Commission on Illumination CIE 115:2010, reduzindo o número de parâmetros necessários e obviando às interpretações diversificadas a que a aplicação directa da norma EN13201 poderia conduzir. As quais pretendem garantir um mínimo de eficiência luminotécnica aos sistemas de iluminação pública.

O ponto de partida do projeto de um sistema de iluminação pública é a classificação da via que se pretende iluminar. Conforme a ANSR Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária, foram considerados os seguintes parâmetros característicos: largura das vias, parques de estacionamento, tipo de zona (central, periférica, histórica) densidade de trânsito motorizado e pedestre. Assim, as vias podem ser classificadas em duas categorias:

- Zonas urbanas
- Zonas rurais

A eficiência energética de uma instalação de IP está fortemente associada a um factor de utilização, que por sua vez dependerá fortemente de factores iniciais:

- 1) Eficiência energética da fonte e acessórios (lm/W)
- 2) Características fotométricas da luminária

Faz-se necessário definir os parâmetros fotométricos adequados para atender a necessidade do local. Na Tabela 23 são estipulados valores mínimos para a iluminância E_{min} e o factor de uniformidade U_{min} , em função do tipo da via.

Tabela 23 - Limites fotométricos para vias de tráfego motorizado e de pedestres [Fonte:ANSR]

Descrição da via	Volume de tráfego	E_{min} (lux)	U_{min}
Vias de trânsito rápido; vias de alta velocidade de tráfego, com separação de pistas, sem cruzamentos em nível e com controle de acesso; vias de trânsito rápido em geral; auto-estradas	Intenso	30	0,4
	Médio	20	0,3
Vias arteriais; vias de alta velocidade de tráfego com separação de pistas; vias de mão dupla, com cruzamentos e travessias de pedestres eventuais em pontos bem definidos; vias rurais de mão dupla com separação por canteiro ou obstáculo	Intenso	30	0,4
	Médio	20	0,3
Vias coletoras; vias de tráfego importante; vias radiais e urbanas de interligação entre bairros, com tráfego de pedestres elevado	Intenso	20	0,3
	Médio	15	0,2
	Leve	10	0,2
Vias locais; vias de conexão menos importante; vias de acesso residencial	Médio	10	0,2
	Leve	5	0,2
Vias de uso noturno intenso por pedestres (por exemplo, calçadas, passeios de zonas comerciais)		20	0,3
Vias de grande tráfego noturno de pedestres (por exemplo, passeios de avenidas, praças, áreas de lazer)		10	0,25
Vias de uso noturno moderado por pedestres (por exemplo, passeios, acostamentos)		5	0,2
Vias de pouco uso por pedestres (por exemplo, passeios de bairros residenciais)		3	0,2

5.2. Limites fotométricos para lâmpadas

é essencial que as características fotométricas de lâmpadas/fontes de luz e luminárias em consideração no projecto de IP cumpram a norma EN 13032, "Luz e iluminação. Medição e apresentação de dados fotométricos das luminárias."

1) Factor de Manutenção da Luminosidade da Lâmpada (FMLL)

O fluxo luminoso decresce ao longo do tempo. A taxa exacta irá depender do tipo de fonte de luz e do balastro/driver [54]. Conforme se apresentam na Tabela 24.

Tabela 24 - Os valores do FMLL de diferentes fontes de luz.

Fonte de Luz	Tempo de Operação (mil horas)				
	4	6	8	10	12
Vapor de Sódio de Alta Pressão	0,98	0,97	0,94	0,91	0,90
Halogenetos Metálicos	0,82	0,78	0,76	0,74	0,73
Vapor de Sódio de Baixa Pressão	0,98	0,96	0,93	0,90	0,87
CFL	0,91	0,88	0,86	0,85	0,84
LED	-	-	-	-	0,95

Nota: No caso da tecnologia LED dever-se-á considerar um FMLL de 0,7 para um tempo de operação de 65.000 horas.

2) Factor de Sobrevivência da Lâmpada/fonte de luz (FSL)

O factor de sobrevivência da lâmpada/fonte de luz (FSL) é a probabilidade das fontes de luz continuarem operacionais durante um determinado período de tempo. Conforme se apresentam na Tabela 25. A taxa de sobrevivência depende do:

- Tipo de fonte de luz.
- Potência.
- Frequência de comutação.
- Balastro/Driver.

Tabela 25 - Os valores do FSL de diferentes fontes de luz.

Fonte de Luz	Tempo de Operação (mil horas)				
	4	6	8	10	12
Vapor de Sódio de Alta Pressão	0,98	0,96	0,94	0,92	0,89
Halogenetos Metálicos	0,98	0,97	0,94	0,92	0,88
Vapor de Sódio de Baixa Pressão	0,92	0,86	0,80	0,76	0,62
CFL	0,98	0,94	0,90	0,78	0,50
LED	-	-	-	-	0,95

3) Factor de Manutenção da Luminária (FML)

Para determinar o factor de manutenção seguimos a Tabela 26.

Entende-se por IP o Índice de Protecção que é um parâmetro que define quais as características de um aparelho de iluminação, que deve ser considerado em função do local de instalação da mesma, nomeadamente quanto à agressividade do ambiente e condições de intempérie. O grau de protecção determina dos parâmetros: a) Protecção de pessoas b) Protecção do equipamento contra a entrada de água no seu interior.

Tabela 26 - Os valores de FML de diferentes tipo das luminárias

	Nível de Poluição	Tempo de Operação (mil horas)		
		4	8	12
IP 55 <i>Difusor de Plástico</i>	Baixo	0,92	0,80	0,71
	Alto	0,87	0,71	0,61
IP 65 <i>Difusor de Plástico</i>	Baixo	0,95	0,84	0,76
	Alto	0,89	0,76	0,66
IP 65 <i>Difusor de Vidro</i>	Baixo	0,97	0,90	0,82
	Alto	0,94	0,84	0,76
IP 66 <i>Difusor de Plástico</i>	Baixo	0,95	0,87	0,81
	Alto	-	0,81	0,74
IP 66 <i>Difusor de Vidro</i>	Baixo	0,97	0,93	0,88
	Alto	-	0,88	0,83

Na análise da depreciação de um sistema é importante ser capaz de reconhecer o tipo e a quantidade de poluição existente, de modo a avaliar convenientemente o tipo de luminária a utilizar, bem como os requisitos de limpeza. Por exemplo, a poluição numa zona industrial é normalmente bastante superior à encontrada numa zona rural. Também o pó seco de uma pedreira é muito diferente do lixo criado pelos insectos.

Poluição	Definição
Alta	Fumo gerado por actividades relativamente proximas, envolvendo as luminarias.
Baixa	Nível de contaminacao ambiente baixo, não existindo fumo ou poeiras gerados nas proximidades. Verifica-se em zonas residenciais ou areas rurais, com trafico ligeiro. Possui um nivel de particulas no meio ≤ 150 (Og/m3)

4) Factor de Manutenção Global (FM)

O Factor de Manutenção (FM) Global deverá ser o resultado do seguinte produto[54]:

$$FM = FMLL \times FSL \times FML$$

Para o cálculo do factor de manutenção deverá ser considerado um período de 3 anos, uma vez que são os valores de referência. Assim, por exemplo:

- Lâmpada de VSAP com luminária IP 66 (difusor de vidro em poluição baixa) fica:

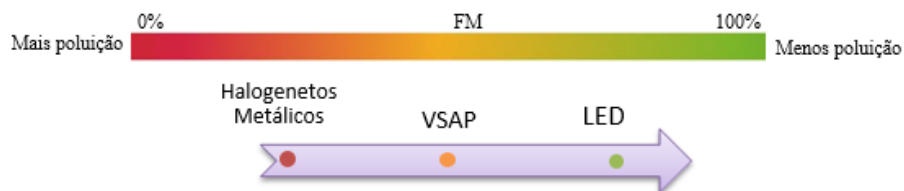
$$FM = 0,90 \times 0,89 \times 0,88 = 0,7$$

- LED com luminária IP 66 (difusor de vidro em poluição baixa) fica:

$$FM = 0,95 \times 0,95 \times 0,88 = 0,8$$

- Halogenetos Metálicos com luminária IP 66 (difusor de vidro em poluição baixa) fica:

$$FM = 0,73 \times 0,88 \times 0,88 = 0,6$$



Sabendo que, todos os valores de desempenho para temperatura ambiente $T_{amb} = 25^{\circ}C$

5.3. Eficiência energética de uma instalação

A eficiência energética de uma instalação de IP define-se como a relação entre o produto da superfície iluminada pela iluminação média em serviço da instalação e a potência total instalada [54]:

$$\varepsilon = S(\text{m}^2) \times \frac{E(\text{lux})}{P(\text{Watt})}$$

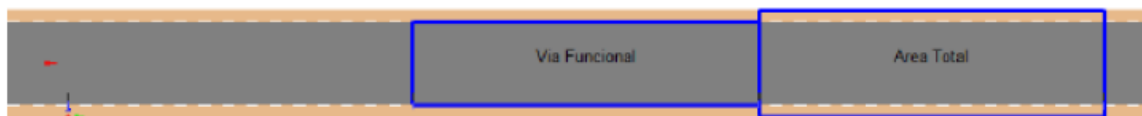
Sendo:

ε : Eficiência energética da instalação.

S : Área total resultante do produto do valor da interdistância entre pontos de luz e largura total da via e passeios, no caso do perímetro urbano, de fachada a fachada.

E : Nível médio de serviço calculado.

P : Potência total das luminárias mais auxiliares intervenientes na área calculada.



A IP nos últimos anos tem levantado o interesse de todas as entidades envolvidas, numa tentativa de dar resposta ao uso racional de energia. Nesse alinhamento, os fabricantes continuam a desenvolver as suas tecnologias. Assim, apresenta-se de seguida uma Tabela de referência que deverá servir de guia para a determinação da eficiência energética na iluminação pública. Não obstante, a mesma poderá ter que ser revista para acompanhar as evoluções tecnológicas e as melhores práticas.

Classificação Energética das Instalações de Iluminação Pública	
Mais Eficiente	
	A
	B
	C
	D
	E
	F
	G
Menos Eficiente	
Instalação:	
Localidade/Rua:	
Horário de funcionamento:	
Consumo de energia anual (kWh/ano):	
Emissões de CO ₂ anual (KgCO ₂ /ano):	
Índice de eficiência energética (I _e):	
Nível de iluminação média em serviço E _m (lux):	
Uniformidade (%):	
Temperatura de Cor (K):	
Opção por visão mesópica:	
Programação da RFL:	

Funcional	Eficiência Energética
A	$\varepsilon > 40$
B	$40 \geq \varepsilon > 35$
C	$35 \geq \varepsilon > 30$
D	$30 \geq \varepsilon > 25$
E	$25 \geq \varepsilon > 20$
F	$20 \geq \varepsilon > 15$
G	$\varepsilon \leq 15$

Em complemento à determinação do índice de eficiência energética, deverá ser calculado o rácio de $W_{\text{médio}}/m^2$, sendo que:

$$W_{\text{média}} = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i \times \text{Tempo de serviço do patamar } i)}{\text{Tempo total de serviço}}$$

Com $n \leq 3$. O índice “i” representa os patamares de potência de um ponto de luz incidente numa área durante o período de funcionamento de um dia.

Os cálculos do consumo energético devem ter como valor de referência o número de horas de utilização diária, igual a 12.

5.4. Poupanças alcançadas até à data com o PNAEE

De acordo com o PNAEE, todas as medidas permitem alcançar 10% de eficiência energética até 2015[12]:

- 10% vs. 8% previstos para 2015 na Directiva 2006/32/CE dos Serviços Energéticos;
- Permitindo mitigar o crescimento da factura energética em 1% por ano até 2015.

Na Figura 109, pode-se observar obviamente que objectivo nacional superior em 20% ao objectivo europeu. (% de poupança vs. média '01-'05).

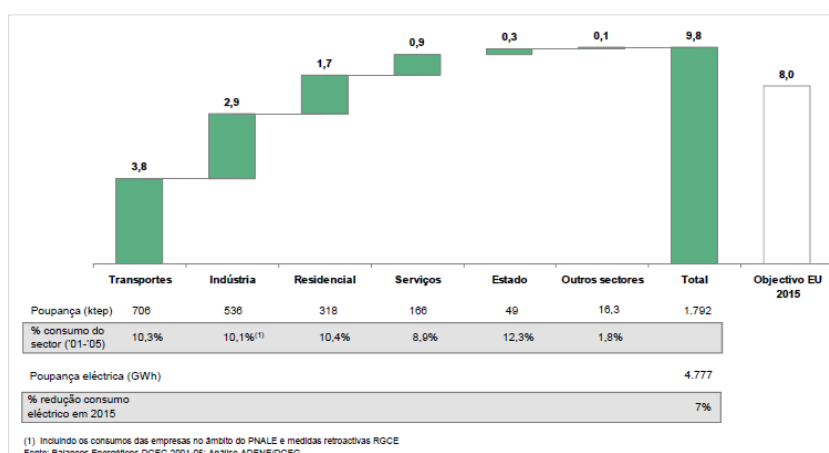


Figura 109 - Impacto das medidas de QEE no consumo de energia em Portugal [PNAEE 2015].

A estimativa da poupança induzida pelo PNAEE até 2016 é de 1501 ktep, correspondente a uma redução do consumo energético de aproximadamente 8,2% relativamente à média do consumo

verificada no período entre 2001 e 2005, o que se aproxima da meta indicativa definida pela UE de 9% de poupança de energia até 2016, (Figura 110).

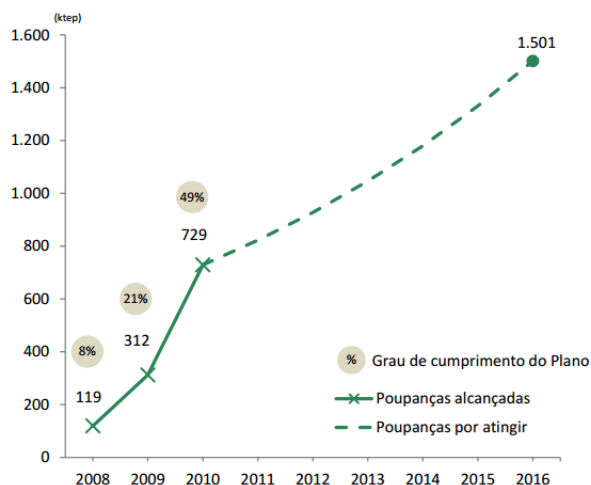


Figura 110 - Impacto previsto das medidas de eficiência energética do PNAEE a 2016 [DGEG].

Actualmente a Iluminação Pública representa 35% das horas dedicadas à manutenção preventiva, correctiva e ordens de serviço comerciais na EDP. A Iluminação Pública também está directamente relacionada com questões de segurança, pelo que as novas directivas da EU para a Iluminação Pública têm este factor em consideração, sendo mais exigentes em termos luminotécnicos (iluminação vertical) em zonas consideradas de elevado risco, onde será necessário garantir um melhor reconhecimento das formas, nomeadamente reconhecimento facial [12].

5.5. Estratégias para futuro

Novas estratégias estão a mudar o ritmo de transição para um novo ecossistema de energia [55, 56].

a) Lighting-as-a Service

b) Estratégia de onda – Wave Strategy

1ª Onda	2ª Onda	3ª Onda
Assets in the Ground	Optimize Inside the Fence-line	Virtual Power Plant

6. Cenário de estudo - resultados

No capítulo 5 abordou-se a metodologia para o projeto luminotécnico de iluminação pública, de seguida apresenta-se a simulação do cenário escolhido enquadrando diferentes medidas para melhorar a sua eficiência energética. Pretende-se efetuar o reconhecimento desse cenário de modo a analisar o que existe.

6.1. Instalação em estudo

A instalação do Posto de Transformação e Seccionamento BRG nº 309, de 630 kVA, 15000/400-231 V e respectiva rede de distribuição em BT e IP, na freguesia de S.Victor, na Avenida João Paulo II em Braga.

O edifício tipo Cabine Baixa⁸ e equipamento eléctrico:

- 1 Transformador trifásico MT/BT em banho de óleo, tipo interior com as seguintes características:
 - Potência normal 630 kVA
 - Tensão primária 15000 V \pm 5%
 - Tensão secundária 400/231 V

⁸ A diferença entre Cabine baixa e Cabine alta é apenas na altura da cabine.

- Frequência 50 Hz
- Grupo de ligações DY5
- 2 interruptores-seccionadores 24 kV/ 400 A, de fecho rápido, dotados de comando mecânico;
- 1 seccionador de corte em vazio de 24 kV/400 A e respectivo comando;
- 1 interruptor seccionamento fusível, 24 kV/400 A, de fecho rápido e abertura automática;
- 4 consolas com isoladores ASN 20, para apoio de barramneto;
- 1 quadro geral BT QGBT tipo aberto, em perfilado de ferro, para circuitos tripolares com interruptor de corte geral de 1000 A;
- 1 quadro IP conforme esquema respectivo;

Barramentos e Ligações:

- Barramento de MT em barra de cobre 30 x 5mm;
- Barramento geral do quadro BT em barra de cobre 50 x 10mm; conforme se mostra na Figura 111.



Figura 111 - Barramento do QGBT

- Ligação do transformador ao quadro BT:

- Fases tipo VV⁹ 2 x 240mm² em cobre.
- Neutro tipo VV 1 x 240mm² em cobre.

Terras:

- São constuidas por dois eléctrodos de terra: de serviços e de protecção.
- As ligações ao eléctrodo de terra de protecção são feitas em cobre nú, de 16 mm² nas derivações e 35 mm² na linha principal.
- As ligações ao eléctrodo de terra de serviço são executadas em cabo do tipo VV 35 mm².

Rede de IP:

- Trifásica e subterrânea, executada em cabo do tipo e secções indicadas VAV¹⁰ 3 x 16/10 mm² e 3 x 25/16 mm².

Segue na Figura 112 o mapa da rede de distribuição da subestação de Lamações e do posto de transformação PTS-BRG-0309 que é alimentado por esta subestação:

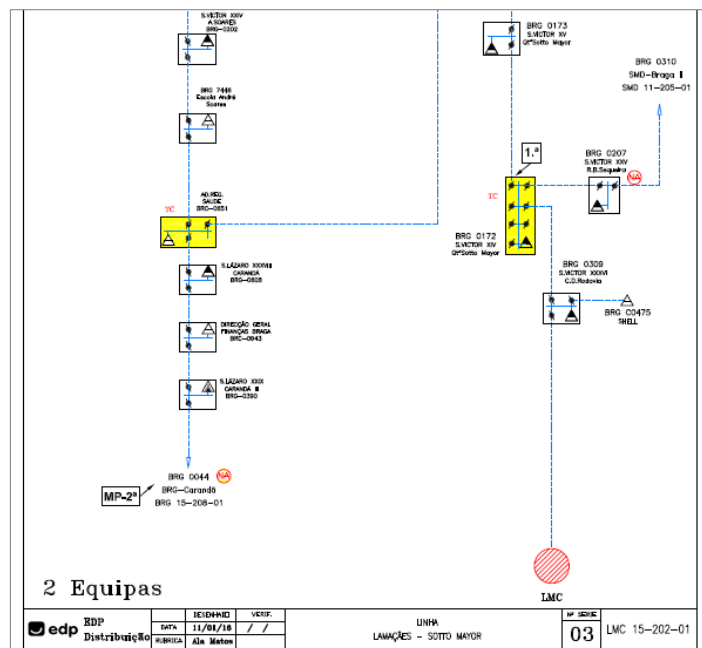
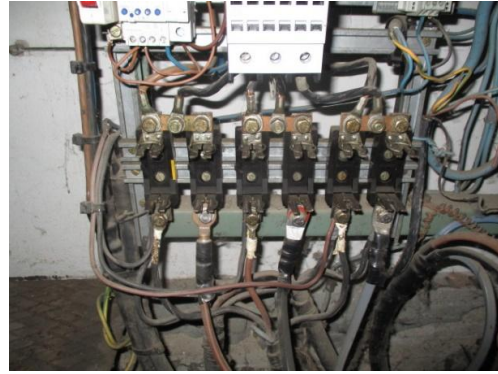
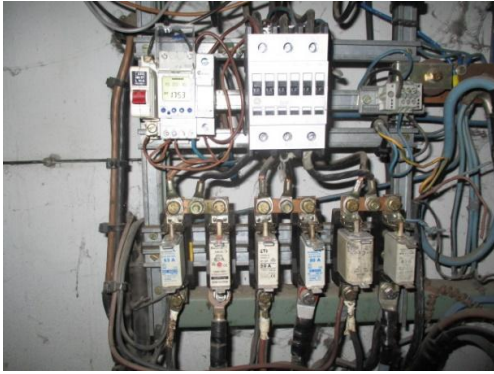


Figura 112 - Carta da rede MT da linha Lamações – Sotto maior

Este PTS alimenta circuitos mistos (LED e vapor de sódio), neste estudo *os circuitos mistos foram desligados*. Como podemos ver Figura seguinte, as fusíveis na Figura à direita estão fora.

⁹ VV significa: Duas camadas do PVC Policloreto de Vinil

¹⁰ VAV significa: Isolamento em PVC, Bainha interior em PVC, Armadura em fitas de Aço, Bainha exterior e PVC.



6.2. Caracterização do local

A zona de Braga escolhida para este estudo é alimentada pelo PTS n.º 309 e a distribuição dos pontos de iluminação pública está ilustrada na Figura 113.



Figura 113 - Traçado da Avenida João Paulo II, em Braga do ponto A ao B,

[Fonte:GeoAct]

O circuito da IP composto por 44 armaduras. Consta-se que todas as lâmpadas são de LED mas possuem diferentes potências (9 de 107 watt, 18 de 139 watt e 17 de 32 watt) dipostas numa extensão de cerca 1000 metros.

Nome da rua	Distância entre PIP's (m)	Comprimento da rua (m)	Nº de PIP's
Part A	30	200	7
Part B	30	835	18

A avenida integra duas partes, a primeira com cerca de 200 metros com:

- 7 postes (5 postes simples e dois postes curvo duplo 1 x 107watt), da marca Schröder modelo TECEO1, como se pode observar na Figura 114, vista do ponto A



Figura 114 – tipo das lâmpadas utilizada a vista do ponto A(esq), do ponto B(dir)

A segunda parte com cerca de 835 metros, com 18 postes exposto na Figura 117, ilustra a vista do ponto B:

- 18 Armadura com 12m de altura da marca Schröder modelo TECEO 2, (64 leds) 700mA, 139W.
- 17 Armadura com 4m de altura da marca Labina modelo da Soneres - LUSA), (16 leds) 32W.

Na Figura 115 podemos ver as ligações do fluke1760 no mode trifásico.

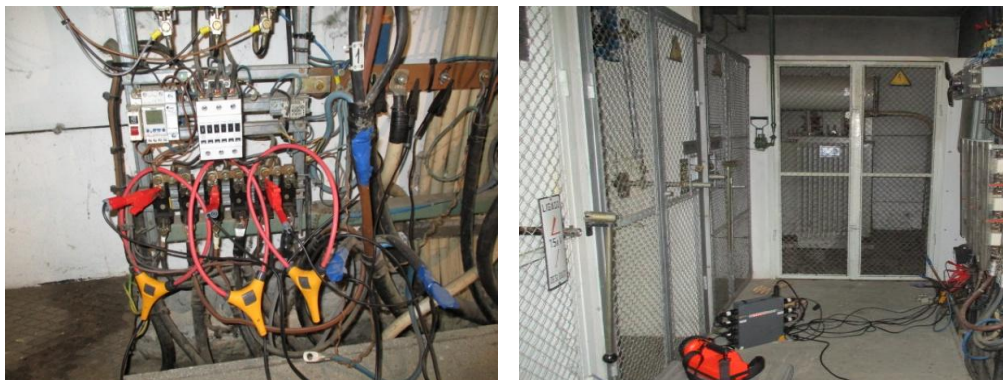
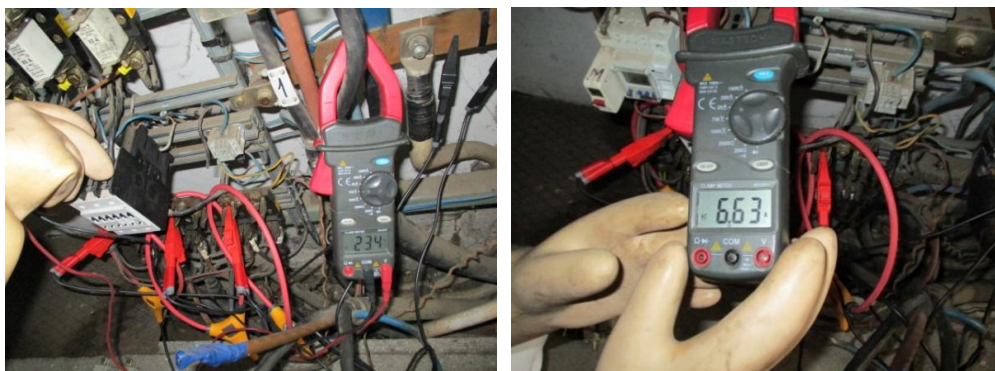


Figura 115 - O aparelho fluke 1760 no terreno.

Medição das tensões e correntes trifásicas :



$V_{L1L2} = 408 \text{ V}$	$V_{L2L3} = 407 \text{ V}$	$V_{L1L3} = 406 \text{ V}$
$V_{f1} = 235 \text{ V}$	$V_{f2} = 234 \text{ V}$	$V_{f3} = 233 \text{ V}$
$I_{f1} = 9.97 \text{ A}$	$I_{f2} = 6.63 \text{ A}$	$I_{f3} = 5.90 \text{ A}$

6.3. Resultados experimentais

As formas de onda da tensão e da corrente medidas registadas no aparelho Fluke1760 são apresentadas nas Figuras seguintes. Começa-se por apresentar os resultados em malha aberta seguindo-se os resultados em malha fechada. São também apresentados os espectras harmónicas de algumas ondas. Os valores eficazes obtidos em cada 10 min.

6.3.1 Resultados em malha aberta

Na Figura 116. são apresentados os resultados obtidos em vazio do fase S da tensão eficaz. Como se pode observar adquirida através de um analisador de qualidade da energia (Fluke 1760), o espectro harmónico para fase S de entrada do sistema de iluminação pública.

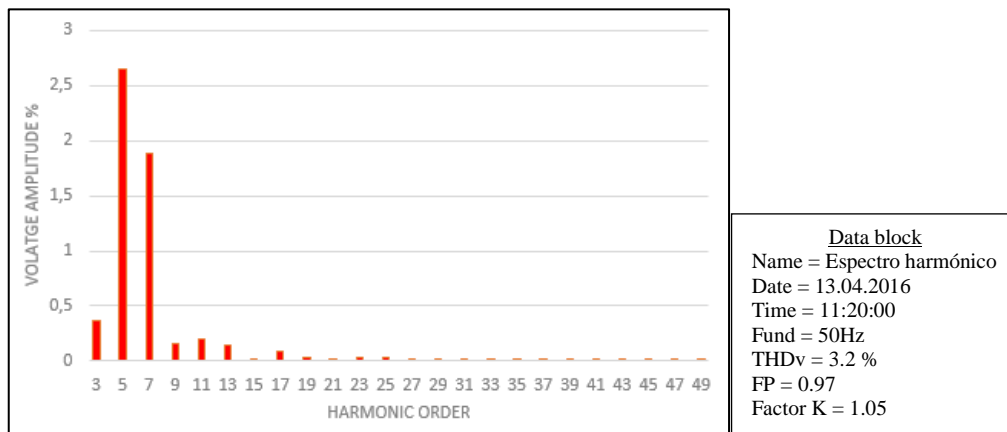


Figura 116 - Espectro harmónico da tensão no PCC numa situação em vazio.

Verifica-se que nesta situação, a THD da tensão é de 3.2% que é abaixo do limite 8% , bem como a IHDv para cada harmónica é aceitável. A Figura 117 ilustra o espectro harmónico da corrente do mesmo fase, onde se observa que as harmónicas mais pronunciadas apresentam valores abaixo do valor limit IHDi < 15% .

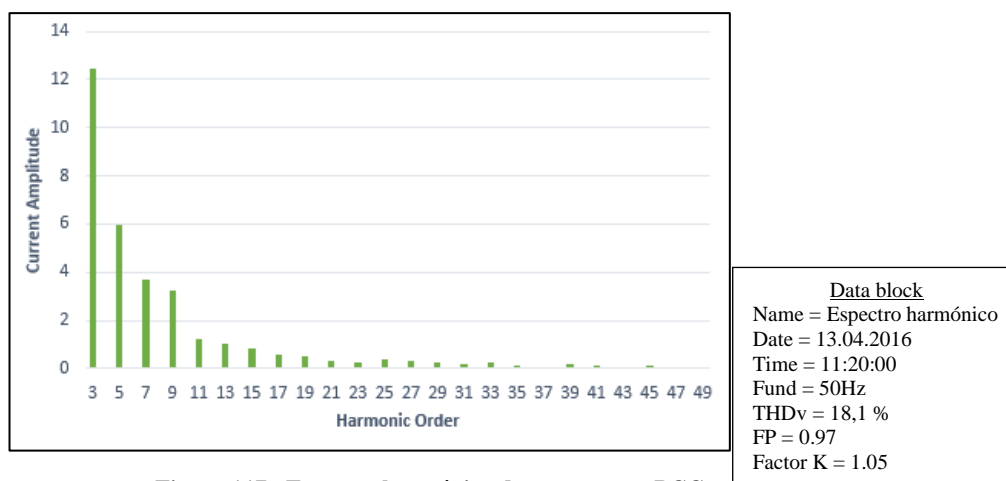


Figura 117 - Espectro harmónico da corrente no PCC numa situação de vazio.

No entanto a taxa de distração harmónica da corrente fica abaixo do limite mas também relativamente elevado, Provocada por os cabos dos equipamentos neste PTS e por causa da qualidade de energia fraca na rede distribuição devido ao elevado número de cargas não lineares que estão ligadas ao transformador de potência que vise.

6.3.2 Resultados em malha fechada

Com potência 4,250 kW das 44 luminaires de LEDs estão ligadas ao TP. Pode-se observar a partir da Figura 118 que em consequência do uso dos balastro electrónico dos LEDs (driveres) geram uma elevada poluição harmónica no sinal da corrente tal como no sinal da tensão.

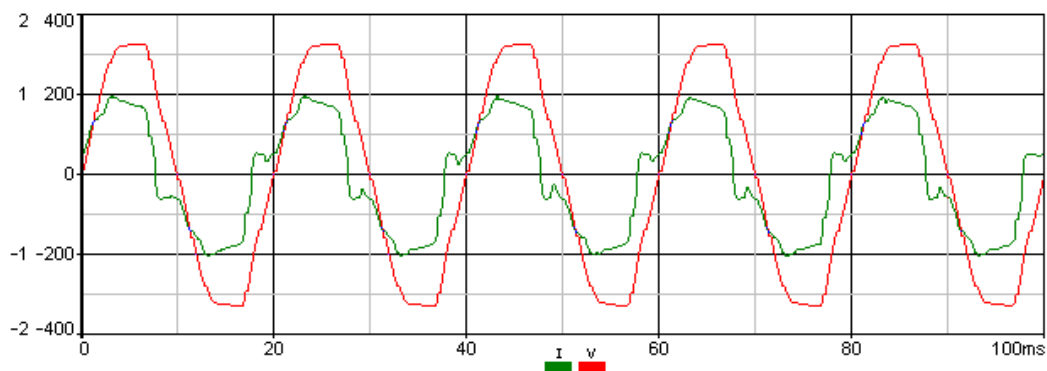


Figura 118 - O oscillograma da tensão e da corrente do fase S no PCC em malha fechada.

Neste caso verifica-se um claro aumento do conteúdo harmónico da corrente e da tensão, a THD da tensão é de 4,74% do valor real da tensão. As harmónicas de tensão mais significativas provocadas são as de ordem 5 e 7. Como pode-se verificar na Figura 119.

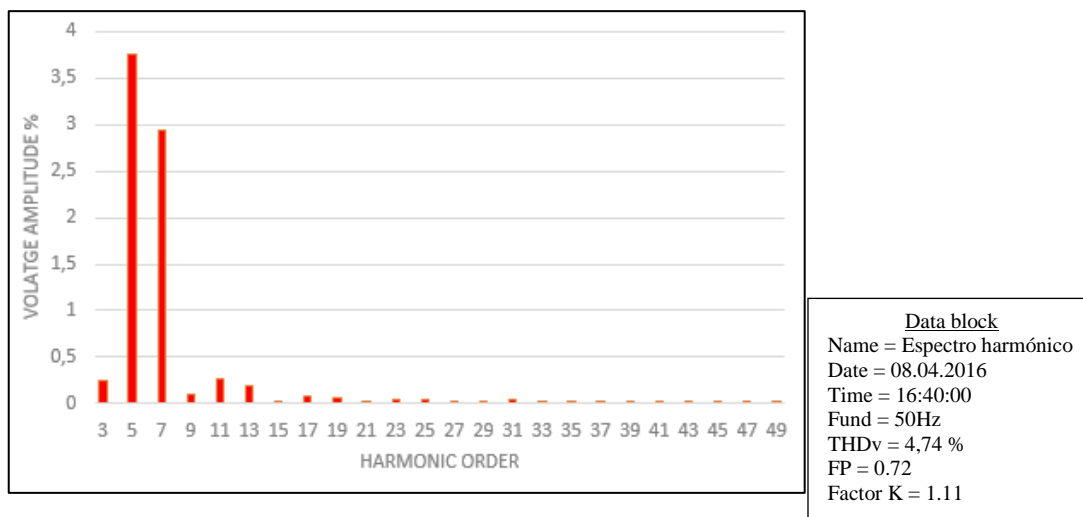


Figura 119 - Espectro harmónico da tensão no PCC em malha fechada.

Em seguida, o espectro harmónico da corrente na Figura 120. De acordo com o esperado, conforme é possível observar a THDi é maior quando existe uma maior percentagem de cargas não lineares (Iluminação com lâmpadas deLED).

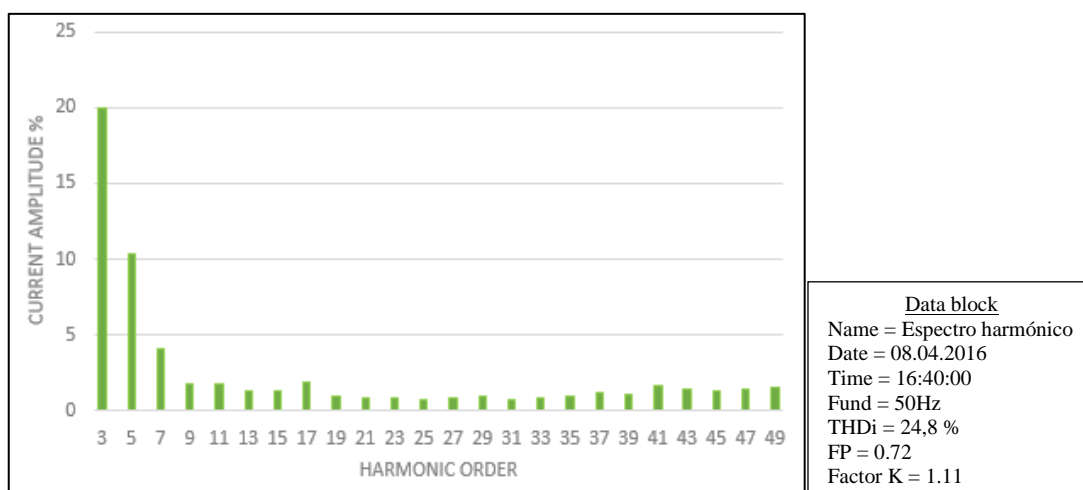


Figura 120 - Espectro da corrente no PCC em malha fechada

A harmónica mais significativas provocada é cuja de ordem 3ª com taxa de distrição individual 20% que é maior do limite 15%.

A THD apresenta pequenas variações de fase para fase, devido ao facto de a distribuição das cargas não ser equitativa pelas três fases. Todos os valores das harmónicas são mostrados numa Tabela no Anexo B.

Foi concluído que o uso de iluminação de LED, aumentam as harmónicas de corrente e diminuem o factor de potência.

6.4. Cálculo das perdas de transformador

Com a presença de harmónicas numa instalação, o factor de potência baixa, acarretando vários problemas. O impacto mais perceptível é o aumento das perdas na instalação e rede eléctrica (devido ao trânsito de potência na rede), e como consequência directa a diminuição do seu rendimento.

O transformador é o maior ativo, o mais importante e o mais caro do sistema eléctrico de potência. Neste sentido, este estudo tem a finalidade de avaliar o impacto das harmónicas ao ciclo de vida útil de transformadores de potência baseada na condição, para evitar perda de vida adicional devido ao acréscimo de carga não linear no sistema.

A potência nominal e o calor que um transformador dissipa em regime de plena carga são calculados com base na hipótese de que o sistema é composto por cargas lineares que não produzem harmónicas. No entanto, se circular pelo transformador uma corrente que contenha harmónicas, ele sofrerá um aquecimento adicional, que poderá levá-lo a uma avaria. A Tabela 27 mostra as características técnicas do transformador no PTS309:

Tabela 27 - Características técnicas do transformador de potência em estudo.

Rated kVA	Rated frequency	Rated HV voltage	Rated LV voltage
630kVA	50Hz	15000 volt	400 volt
Rated current HV	Rated current LV	U _{sc} %	Ohmic resistance
24.24 A	909.32 A	4 %	0.0029 Ω
Load Loss	No-Load Loss	Ambiente temperature	Winding temperature rise
6500 watt	600	35 °C	65 °C

$$Z_{TR} = \frac{U_{20}^2}{S_n} = \frac{(400 \times 1.05)^2}{630 \times 10^3} \times 4\% = 11 \text{ m}\Omega$$

$$I_{sc} = \frac{U_{20}}{\sqrt{3} \times Z_{TR}} = \frac{400 \times 1.05}{\sqrt{3} \times 11 \times 10^{-3}} = 22 \text{ kA}$$

Nos transformadores a presença de harmónicas resulta na desclassificação K-factor da máquina. O factor K indica quanto se deve reduzir a potência máxima de saída quando existirem harmónicas.

Sendo a potência máxima fornecida por um transformador dada por:

$$S_{max} = \frac{S_{nom}}{K}$$

Desta forma facilmente se verifica que quanto maior for o factor K , menor será a potência máxima que o transformador consegue fornecer. O aparelho fluke permite medir o factor de desclassificação, possibilitando assim o cálculo da potência máxima que um transformador inserido numa determinada instalação consegue fornecer, com a presença de harmónicas. Conforme se mostram na Tabela 28.

Tabela 28 - Resultados - Impacto do factor de potência e factor K ao transformador.

		Em vazio	Carga LEDs	Desvio padrão %
Parâmetros do Transformador	Factor K	1.05	1.11	↑ 5.4%
	FP	0.97	0.72	↓ 25 %
	Smax (kVA)	600	567.5	↓ 5.4 %
	P (kW)	576	471	↓ 18.2 %
	Predas de carga (W)	6825	7575.75	↑ 11 %
	Q (kVAr)	168	316.5	↑ 47 %

Como consequência, aumentou o conteúdo harmónico da forma de onda da tensão e também elevou o Factor K. E pode-se observar também à redução da capacidade de fornecimento da energia ativa, por causa do baixo factor de potência.

Portanto, se for necessário ter um transformador com uma dada potência, caso existam harmónicas, o transformador a adquirir terá de ter uma potência aparente muito superior (elevados custos) ou então projectar técnicas para eliminar estas perturbações.

As perdas totais nos enrolamentos, sob condições não-sinoidais, são calculadas através da equação seguinte apresentada no trabalho realizado em:

$$P_{loss} = P_{NL} + P_{LL}$$

Sendo:

P_{NL} – Perdas de ausência de carga. Presume-se de acordo com as normas tais como ANSI/IEEEC57.110 que a presença de harmónicas não aumenta a perda do núcleo.

P_{LL} – Perdas de carga.

Pode-se observar na Tabela 28 como as perdas de carga aumentam 11 % , este significa aumenta na temperatura hotspot do transformador (perdas térmicas) que considera um parametro tão importante porque está diretamente relacionada à estimativa da vida útil do transformador. Dependendo à metodologia FEM (*Finite Element Method*) a estimativa da vida útil do TP será calculada a partir da equação seguinte dependada da sua temperatura Hotspot θ_{HS} :

$$Life(pu) = 9.8 \times 10^{-18} \times e^{\frac{15000}{\theta_{HS} + 273}}$$

$$\theta_{HS} = \theta_A + \theta_{TO} + \theta_g$$

Sendo:

$$\theta_{TO} = \theta_{TO-R} * \left(\frac{P_{LL} + P_{NL}}{P_{LL-R} + P_{NL}} \right)^{0.8} = 60 * \left(\frac{7575.75 + 600}{6825 + 600} \right)^{0.8} = 64.8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_g = \theta_{g-R} * \left(\frac{P_{LL}}{P_{LL-R}} \right)^{0.8} = 10 * \left(\frac{7575.75}{6825} \right)^{0.8} = 10.87 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{HS} = 35 + 64.8 + 10.87 = 110.67 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Life(pu) = 0.9 \quad \gg \gg \quad A \text{ vida real} = 0.9 \times 30 = 27 \text{ anos}$$

Load losses [W]	7575.75
Operation time [h/year]	8760
Cost for load losses [€/year]	7134
Energy savings [€/year]	706

Resultado: A Figura 121 mostra-se o diagrama das perdas adicionadas por causa das harmónicas:

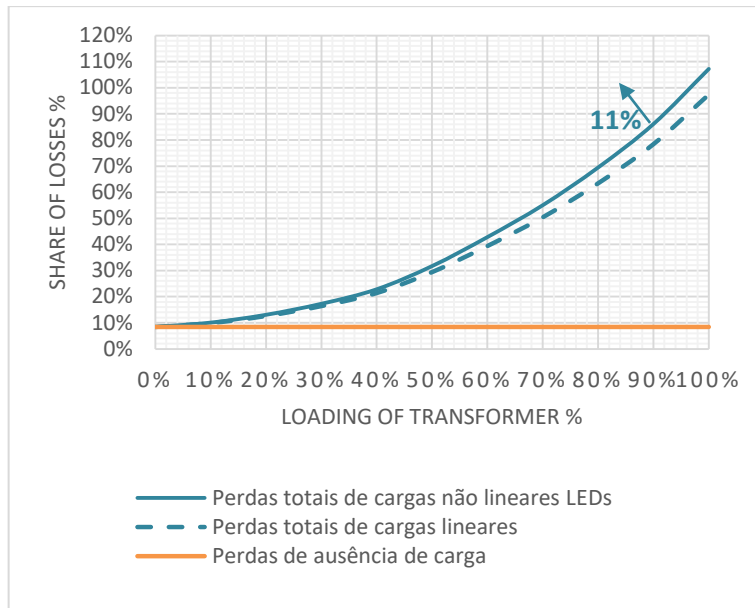


Figura 121 - Perdas de carga adicionadas do transformador 630kVA.

7. Proposta de solução, Implementação, Validação

Na maioria das situações, utiliza-se a instalação de condensadores em paralelo, para se obter um bom resultado. No entanto, existem situações especiais em que o recurso a esta solução não é a mais adequada, devendo, nestes casos, utilizarem-se equipamentos especiais, tais como a compensação síncrona ou a compensação electrónica de potência e filtros de supressão de harmónicas.

Informações necessárias

Potência de instalação atual:

Avenida	nº Luminarias		Potencia Unitaria (w)	Potencia total (w)	6% consumo equipo electrónico	Potencia total (w)
João Paulo II	44 tipo LED	9	107	4009	247	4250
		18	139			
		17	32			

A facturação de energia reactiva:

As regras de facturação de energia reactiva, indutiva e capacitiva, relativas ao uso da rede de distribuição, constam do RRC e de Despachos da ERSE 7253/2010 de 19 de Abril e 12605/2010 de 29 de Julho. Os clientes ligados às redes de distribuição de alta e de média tensão, bem como os ligados às redes de distribuição de baixa tensão e classificados como BTE, (acima de 41,4 kW), estão sujeitos à facturação de energia reactiva[107]:

- Energia Reativa consumida fora das horas de vazio, quando excede 30% da Energia Ativa¹¹.
- Energia Reativa fornecida à rede nas horas de vazio.

Os escalões a considerar na facturação da energia reactiva indutiva são os seguintes mostrados na Tabela 29:

Tabela 29 - Escalões para facturação da energia reactiva indutiva.[EDP-D 2011]

Escalão	Descrição	Factor multiplicativo
Escalão 1	Corresponde a $30\% \leq \text{tg } \varphi < 40\%$	0,33
Escalão 2	Corresponde a $40\% \leq \text{tg } \varphi < 50\%$	1
Escalão 3	Corresponde a $\text{tg } \varphi \geq 50\%$	3

7.1. Proposta de solução

1ª proposta: bancos de condensadores trifásico

Uma das medidas propostas para a compensação do factor de potência é a da instalação de um sistema central de bateria de condensadores. Esta é considerada uma técnica de compensação estática, exata em cada instante e que atua mais rapidamente sobre o circuito considerado.

Para calcular a capacidade do banco de condensadores a adquirir de forma a diminuir a factura da de energia. Possa obtê-la a partir equações apresentadas no Anexo C. Sabendo que da análise da faturação em vigor, haverá todo o interesse para que a energia reativa não exceda os 30% da energia ativa, nas horas fora de vazio. Os dados são mostrados na Tabela 30.

¹¹ Faturação efetiva, após 8 meses da data início do contrato.

Tabela 30 - Resultados após da correção do factor de potência

Situação antes da correção					
P (kW)	$\cos \theta_1$	U (V)	I_1 (A)	S_1 (kVA)	Q_1 (kVAr)
4,250	0,72	231	14,75	5,903	4,1
Situação após da correção					
P (kW)	f (Hz)	$\cos \theta_2$	I_2 (A)	S_2 (kVA)	Q_2 (kVAr)
4,250	50	0,96	11	4,427	1,24
Características do banco de condensadores desejado					
P_l (kW)	P_l (%)	C (μF)	I_c (A)	ΔS (kVA)	ΔQ (kVAr)
1,416	33%	3×32	$3 \times 7,12$	1,475	2,85

Depende dos dados do software CIRCUTOR , o banco de condensadores será igual a 7,5 kVAr , model OPTIM. Confira folha de especificação no Anexo D .

Outro fabricante ZEZ SILKO oferece os bancos de condensadores para baixa tensão, também pode-se ver folha especificação no Anexo D. Então as características do banco são:

Tipo	Q_c (kVAr)	C (μF)	I_c (A)
CSADG 1-0,44/7,5	7,5	$3 \times 41,1$	$3 \times 9,9$

Bem como estive a validar os bancos de condensadores e não há bancos tão pequenas como pretendia (2,85 kVAr), no entanto ofereco cotação para o banco mais pequena, 7,5 kVAr através outra fabricante, as características são:

Fabricante	Referência	Escalões	Potência (kVAr a 400V)	Preço (€)
Norcontrol, Lda	61CAMH1507	2,5 – 2,5 – 2,5	7,5	968,50

Ponho no Anexo D a tabela de preços de um dos fornecedores de forma a conseguir validar alguns preços de outros bancos com different potências. Sabendo que os dados obtidos pela EDP Comercial que tem desconto sobre essa tabela.

No entanto, é importante ter em consideração que este tipo de compensores de compensadores de potência reactiva deve ser capaz de fornecer correntes com harmónicas, tendo estes uma frequência

mais elevada do que a fundamental. Uma outra consequência possível, é a ocorrência de ressonâncias que poderão produzir excessos de corrente e de tensão.

Como já referido há algumas possibilidades de melhoria no factor de potência de retificadores não controlados: soluções passivas; soluções ativas.

Por isso e considerando o tipo de carga que terá os LEDs, faço notar que só colocar um condensador na entrada não será uma solução muito eficaz. A solução mais provável será a colocação de filtros passivos, sintonizados com a frequência das harmónicas de maior amplitude, que neste trabalho é igual a 150Hz. Esta solução será discutida na seguinte.

2ª proposta: Filtro passivo

Os filtros passivos são os mais utilizados actualmente. No entanto, apesar de serem mais simples de implementar e mais económicos apresentam várias desvantagens. Estes filtros consistem num circuito LC indutivo e capacitivo, como se mostra na Figura 122, sintonizado de modo a que a sua impedância tenha o valor mais baixo possível à frequência de um harmónico. Isto significa que estes filtros apenas filtram as frequências para as quais foram sintonizados. Para além dessa desvantagem, estes filtros devem ser sobredimensionados porque não é possível limitar a potência que irão suportar. Podem também provocar fenómenos de ressonância com outras cargas e o seu dimensionamento deve ter em atenção as necessidades de potência reactiva da carga. Devido a todos estes factores, a utilização de filtros activos torna-se na maioria dos casos mais vantajosa do que a utilização de filtros passivos.

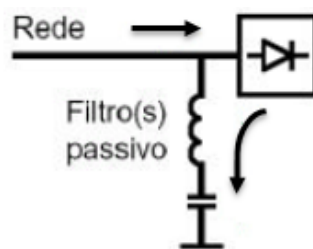


Figura 122 - Filtro passivo

3ª proposta: Filtro Activo

Os filtros activos, funcionam de forma dinâmica, o que lhes permite operar mesmo com uma constante alteração das cargas onde estão inseridos. Como só fornecem a energia que lhes é permitida, de acordo com as suas características técnicas, não sofrem danos ao compensar as harmónicas. Estes filtros dividem-se em dois tipos, os filtros activos série e os filtros activos paralelos. Existe ainda a possibilidade de combinar ambos. O filtro activo reinjetado em oposição

de fases as harmónicas apresentam sobre a alimentação da carga, de tal sorte que a corrente de linha seja senoidal. Como se mostra na Figura 123.

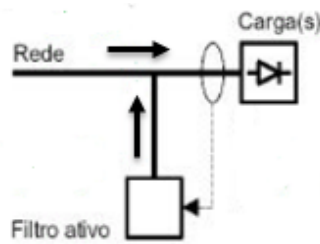


Figura 123 - Filtro Activo.

4ª proposta: Filtro híbrido

Princípio de funcionamento: Os dois tipos de dispositivos anteriores podem ser associados a um mesmo equipamento e constituir um filtro híbrido. Esta nova solução de filtragem permite acumular as vantagens das soluções existentes e de cobrir um largo domínio de potência e de performances. Como se mostra na Figura 124.

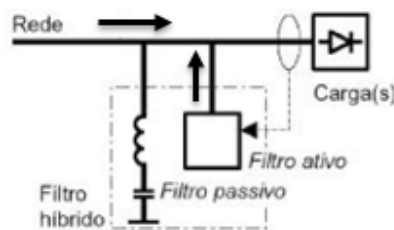


Figura 124 - Filtro híbrido.

Critérios de escolha

- O filtro passivo permite (ao mesmo tempo):
 - a. a compensação de energia reativa,
 - b. uma grande capacidade de filtragem em corrente.

A instalação onde substituímos o filtro deve apresentar uma estabilidade suficiente, com pouco de flutuação da carga. Se a potência reativa fornecida é importante, é aconselhado colocar fora de tensão o filtro passivo durante os período de fraca carga. O estudo de ligação de um filtro deve levar em conta a presença eventual de um banco de compensação e pode conduzir a sua supressão.

- Compensador activo permite a filtragem das harmónicas sobre uma larga faixa de frequência. Ele se adapta a não importa qual carga. Entretanto, sua potência harmónica é limitada.
- O filtro híbrido reuni o conjunto das performances dos filtros passivos e ativos.

7.2. Implementação de solução

A figura 125 representa o esquema do banco dos condensadores implementado. Este banco trifásico é constituído por três condensadores ligados em triângulo.

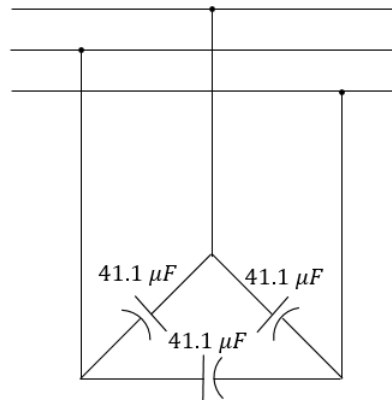


Figura 125 - Esquema do banco de condensadores.

Pode-se também recorrer à utilização de um filtro LCL (Figura 126). Este consegue ter uma atenuação ainda maior do que o filtro LC, para as mesmas dimensões.

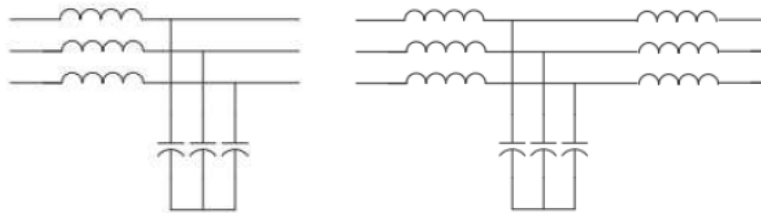


Figura 126 - Esquema de um filtro passivo LC, LCL respectivamente.

O filtro activo paralelo por sua vez funciona em paralelo com a carga e tem como objectivo injectar correntes nas linhas de modo a compensar as distorções. Na Figura 127 apresenta-se o esquema eléctrico de um filtro activo paralelo trifásico, que além de compensar as harmónicas e reactivos de corrente, também permite equilibrar as correntes das três fases, eliminando assim a corrente no neutro da rede eléctrica. Este filtro é, basicamente, composto por um inversor fonte de tensão com controlo de corrente e o respectivo controlador. O controlador, a partir da medida dos valores instantâneos das tensões das fases (v_a , v_b , v_c) e das correntes na carga (i_a , i_b , i_c), produz as correntes de compensação de referência (i_{ca}^* , i_{cb}^* , i_{cc}^* , i_{cn}^*) para o inversor. O inversor injecta as correntes de compensação (i_{ca} , i_{cb} , i_{cc} , i_{cn}) requeridas pela carga, de forma que as correntes nas fases da rede eléctrica (i_{sa} , i_{sb} , i_{sc}) passam a ser sinusoidais e equilibradas, fazendo com que a corrente no neutro da rede eléctrica (i_{sn}) assuma um valor nulo.

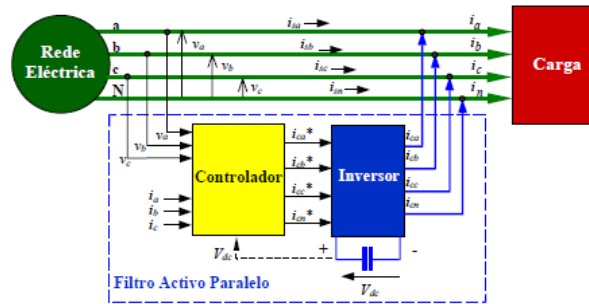


Figura 127 - Esquema de um filtro ativo paralelo para um sistema trifásico [GEPE].

A energia reactiva é fornecida pelo filtro tal como os harmónicos. Para além disso, o filtro também redistribui as correntes pelas fases e pelo neutro de forma a equilibrar a carga.

Para se perceber melhor a interligação dos vários blocos, conforme o diagrama de blocos completo da implementação se ilustram na Figura 128, 129. Como se pode observar, os LEDs são alimentados pela tensão contínua do rectificador. O transformador de potência está a alimentá-los paralelamente com o banco de condensadores proposto. Pode-se observar também os blocos dos filtros como propostas alternativas de forma a filtrar as harmónicas provenientes do processo de rectificação.

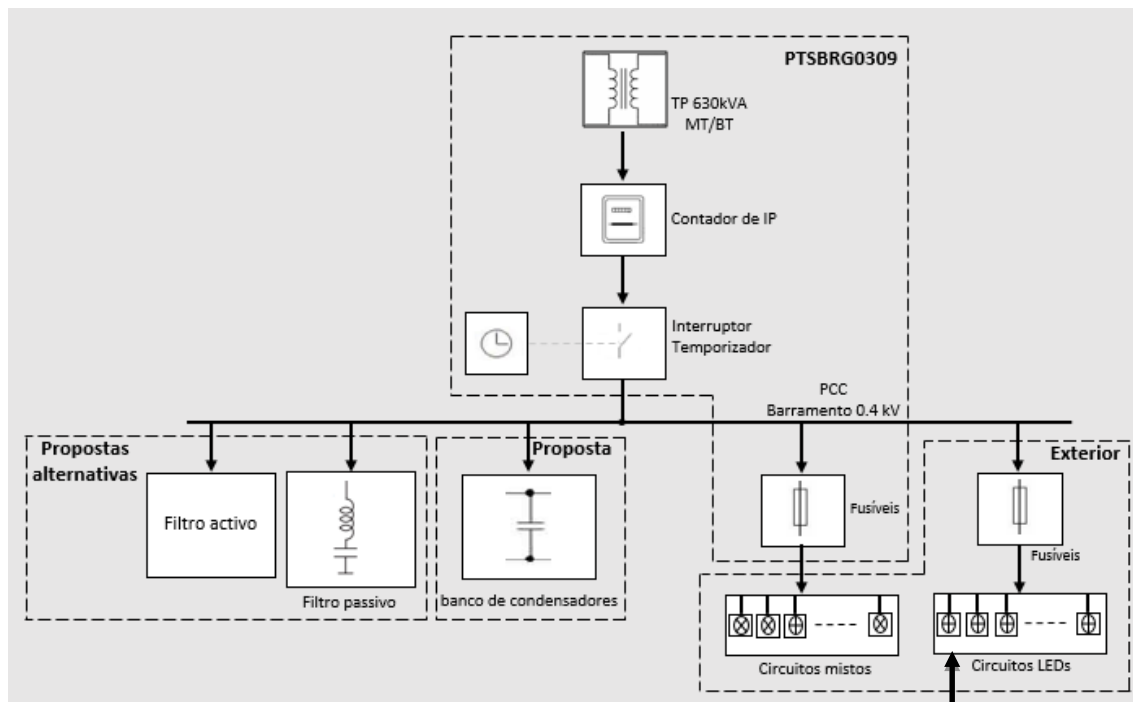


Figura 128 - Diagrama em blocos da implementação.

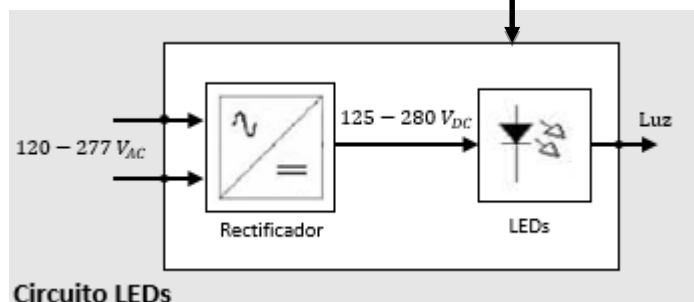


Figura 129 - Diagrama de bloco do circuito LEDs.

7.3. Validação de solução

A opção de manter a iluminação pública ligada com o mesmo nível de fluxo a noite inteira, provoca igualmente um desperdício energético, visto não estar adequada à quantidade de tráfego existente em cada momento; os níveis de iluminação requeridos nas horas de ponta não se adequam às horas de vazio ou super vazio. Esta medida implica a utilização de balastros eletrónicos que permitam a regulação de fluxo (*dimming*) das lâmpadas, ou seja, balastros eletrónicos com redução noturna de fluxo luminoso pré-programado.

A IP funciona através de um relógio astronómico, ou seja segue um horário pré definido. Na Tabela 31 pode-se ver esse horário juntamente com mais alguns pormenores necessários para o cálculo que vai ser efetuado. De seguida na Tabela 31 temos também as horas de funcionamento da IP.

Tabela 31 - Horário do relógio astronómico.

Relógio astronómico		Horas/dia	Período	Dias
Horário de verão	21h - 6:30h	9,5	6 meses	183
Horário de inverno	18h - 8h	14	6 meses	182

Considerou-se que em média a IP está ligada 11 horas por dia, das 19h às 6h e a programação do driver pré-programado é mostrado na Figura 130:

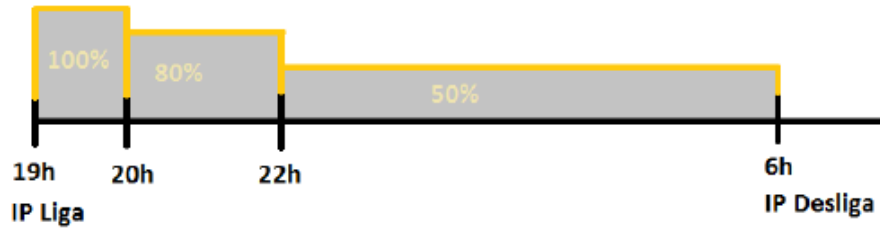


Figura 130 - Programação do driver

Determinou-se o número de horas à potência nominal, a 80% da potência nominal e a 50% da potência nominal, então as horas de funcionamento da IP são mostradas na Tabela 31. Sabendo que a potência instalada de 4.250 kW , Tarifa de energia de IP de 0.11 €/kWh e Onde o valor da energia combinada é de $0.47 \text{ ton CO}_2/\text{MWh}$. O consumo anual, determinou-se o custo da energia que o município terá de pagar serão calculados na Tabela 32.

Tabela 32 - Consumo de custo da energia consumida antes da correção.

Horas por ano			
Sem dimming		Com dimming	
11h	1h	2h	8h
4015 h/ano	365 h/ano	730 h/ano	2920 h/ano
Consumo kWh por ano			
100%	100%	80%	50%
17063.75 kWh/ano	1551.25	2482	6205
Consumo total kWh por ano			
17063.75 kWh/ano		10233.25 kWh/ano	
Custo da energia €/ano			
1877 €/ano		1125.65 €/ano	
Ton CO ₂			
8 ton CO ₂		4.81 ton CO ₂	

Sabendo que o excedente na utilização da energia reativa, e para a concessionária neste caso com a possibilidade de liberar e vender a outros consumidores 1.457 kVA , bem como a potência liberada

é igual de 1.416 kW. Os dados obtidos da Tabela 30. Agora serão calculados na Tabela 33 o custo da energia após da correção do factor de potência e o *payback*.

Tabela 33 - Consumo de custo da energia consumida após da correção	
Consumo total kWh por ano	
$10233.25 \times 0.67 = 6856.27 \text{ kWh/ano}$	
Custo da energia €/ano	
754.2 €/ano	
Ton CO₂	
3.22 ton CO ₂	

A Figura 131 mostra-se as poupanças potenciais de consumo de energia, bem como de toneladas

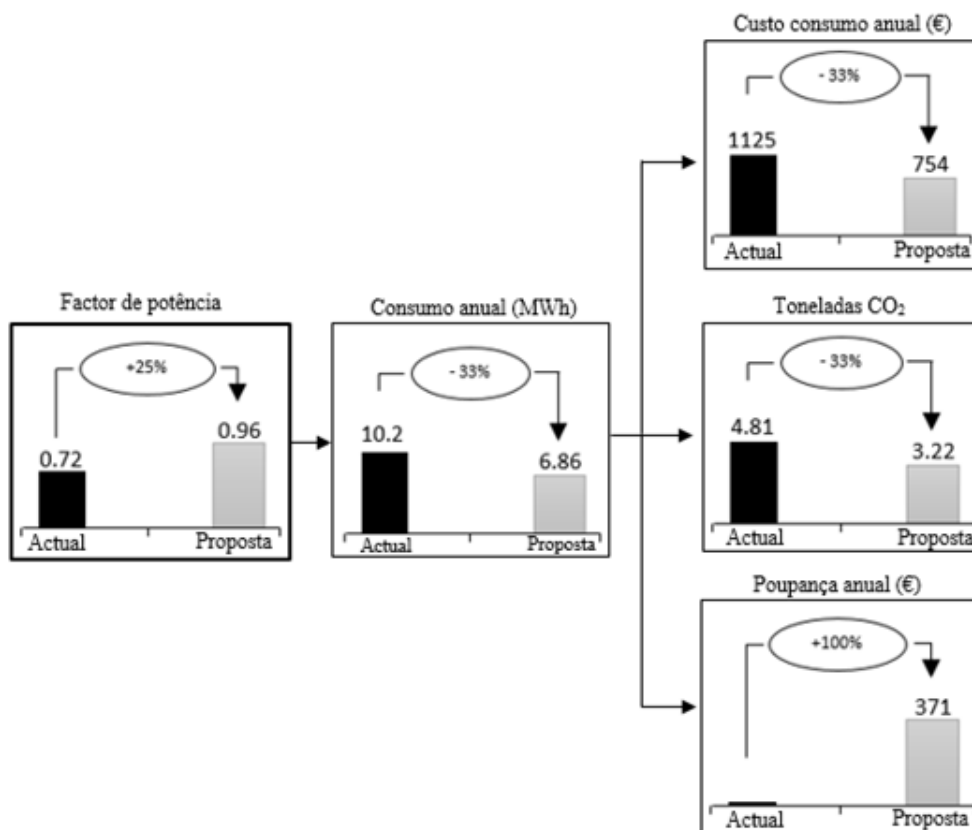


Figura 131 - Poupanças potenciais.

Com esta informação consegue-se obter um dado relevante para o investimento que é o *Payback* (Período de Recuperação do Investimento), isto é, quanto tempo leva o novo projeto a ter retorno. Assim, quanto menor for o *Payback* mais vantajoso se torna o investimento e, naturalmente,

apresenta-se a melhor solução e energeticamente mais eficiente. Divulgo cotação de preços do banco de condensadores desejado. Os dados obtidos pela EDP comercial.

Fornecimento = 418.75 €

Instalação = 549.75 €

Preço total = 968.50 €

$$Payback = \frac{\text{Investimento}}{\text{Poupança anual}} = \frac{1 \times 968.50 \text{ €}}{(1125.65 - 754.2) \text{ €/ano}} = 2,6 \text{ anos}$$

Verifica-se que o retorno do investimento é baixo.

Como já referido no início desta dissertação que, de acode dos dados pela EDP distribuição, no total foram instalados mais de 6.600 luminária LED no segmento da iluminação pública em toda a área geográfica de Portugal continental, tendo participado 115 municípios. Assumiu-se que em média a potência destas luminárias é 130 Watt dipostas numa extensão de cerca 93 km. Considerou-se que em média distância entre PIP's (25m) e N° de PIP's são 3750 postes. Confira os dados na Tabela 34.

Tabela 34 - Custo da energia consumida total das todas luminárias LED em Portugal

Consumo total atual kWh por ano	Consumo total após correção
2066922 kWh/ano	$2066922 \times 0.67 = 1384837.74 \text{ kWh/ano}$
Custo da energia atual	Custo da energia com correção
227.36 M€/ano	152.33 M€/ano
Ton CO₂ atual	Ton CO₂ após correção
971.45 ton CO₂	650.87 ton CO₂

Se cada 1 km precisa de um banco de condensadores, para 93 km então serão 93 bancos de condensadores, de forma a calcular o *payback*:

$$Payback = \frac{\text{Investimento}}{\text{Poupança anual}} = \frac{93 \times 968.50 \text{ €}}{(227.36 - 152.33) \text{ M€/ano}} = 1,2 \text{ anos}$$

8. Conclusões, Limitações e Propostas de Trabalho Futuro

Este capítulo é direccionado para apresentar as conclusões sobre o trabalho efectuado e são também abordadas algumas propostas de trabalho futuro de forma a melhorar alguns aspectos e superar as limitações encontradas na presente dissertação.

8.1. Conclusões

Quando se falava em problemas da qualidade de energia, tratava-se essencialmente da compensação do factor de potência e continuidade do serviço de distribuição. Até há pouco tempo atrás, as cargas na sua grande maioria eram lineares e desta forma as correntes consumidas eram sinusoidais. No entanto, nos dias de hoje, o uso cada vez intensivo de cargas não lineares, tem provocado o aumento do conteúdo harmónico na rede eléctrica, o que causa diversos problemas tanto no transporte como na distribuição da energia.

O aumento das perdas de energia, o aparecimento de correntes onde elas não deveriam existir, um mau funcionamento de alguns dispositivos de protecção, o sobreaquecimento de alguns componentes e a diminuição do seu tempo de vida útil, são alguns exemplos de problemas causados pelos harmónicos que merecem alguma atenção.

Esta dissertação versou um assunto actual e de grande relevância para as indústrias em geral: o problema da qualidade de energia eléctrica. Mercê da utilização crescente e generalizada de equipamentos de electrónica de potência, que poluem os sistemas eléctricos, e necessidade da automatização dos sistemas de produção, que obriga a que cada vez mais se utilizem controladores electrónicos, extremamente sensíveis ao meio electromagnético em que estão inseridos, a atenção dada a qualidade da energia eléctrica é crucial tendo em vista a garantia da qualidade do produto final e a redução de custos de produção.

Com o crescente número de sistemas de iluminação de LEDs ligados à rede eléctrica, aumentam também os problemas na Qualidade de Energia Eléctrica. Esta tese teve como objectivo analisar alguns dos indicadores de QEE que resultam da introdução da iluminação de LEDs na rede BT e propor estratégias de mitigação dos seus efeitos na qualidade de energia eléctrica, nomeadamente na Taxa de Distorção Harmónica de tensão e de corrente, assim como no factor de potência.

A iluminação pública constitui um importante factor económico na sociedade atual, uma vez que é responsável por uma fatia considerável nos gastos energéticos mundiais. A factura relativa à iluminação pública pode ultrapassar 50% do total do orçamento dos municípios. Neste trabalho verificou-se que em Portugal a iluminação pública representa mais de 3.2% do consumo total da energia eléctrica, sendo cerca de 1.5 TWh. Aplicando o tarifário em vigor, corresponde a cerca de 150 M€ por ano. Sabe-se que nos últimos anos se tem verificado uma tendência de aumento da rede de IP cerca de 4 a 5% por ano, pelo que se deve ter em conta a aplicação de um conjunto de medidas direccionadas ao aumento da eficiência energética no segmento de IP. Só do fim do ano 2015 e até à presente data, foram instaladas mais de 6.600 lâmpadas de LED em toda a área geográfica de Portugal continental, repartidas por 115 municípios.

Neste trabalho foi apresentado um sistema de iluminação pública eficiente empregando diodos emissores de luz (LEDs). A tecnologia LED é inovadora e tem um tempo de vida útil bastante superior ao das lâmpadas convencionais, sendo que o período de manutenção pode chegar aos 15anos, reduzindo-se assim os custos de manutenção, e o baixo consumo deste tipo de lâmpada traduz-se numa redução substancial da fatura energética. No entanto os LEDs são cargas não lineares, que são utilizados em conjunto com os alimentadores, os *drivers*. Estes funcionam a frequências elevadas e apresentam vantagens tais como o alto rendimento, maior rapidez, redução do volume dos componentes magnéticos e ausência de ruído audível. Os *drivers* utilizados são controlados totalmente de forma a permitir *dimming*.

A técnica PWM é muito utilizada na alimentação de LEDs principalmente quando a variação da intensidade luminosa constitui um requisito. E o que distingue os drivers controlados (*switch-mode*) de outros mais comuns é o facto de que garantem um rendimento luminoso elevado quando

comparado com os drivers corrente constante lineares. No entanto, uma das principais desvantagens da utilização do PWM é ser capaz de gerar as harmónicas provenientes das comutações dos semicondutores. Como consequência disso, as perdas apresentadas por este método são significativas (perdas dos semicondutores + perdas das comutações). Além disso, é importante ter em consideração que a relação entre a *corrente forward* e o *fluxo de luminosidade* é linear, ou seja, a variação da luminosidade implementada por este método apresenta perdas. Por isso, recomenda-se utilizar uma frequência de comutação fixa, quando este método for utilizado, de forma a filtrar mais facilmente as harmónicas.

Neste trabalho, elaborou-se um estudo sobre as harmónicas. Esse estudo foi importante na medida em que ajudou a perceber melhor o que são, como as quantificar, como surgem, quais os danos que elas podem provocar nas cargas e como se propagam na rede. Isso permite ter um maior conhecimento associado às comutações dos semicondutores utilizados nos drivers, bem como as harmónicas no PCC.

A elaboração deste trabalho permitiu alertar para a necessidade da utilização de condensadores e/ou sistema de filtragem para correcção do factor de potência da instalação, a correcção do fator da potência da rede de distribuição, para além da diminuição da potência instalada e da necessidade de manter iluminâncias mínimas requeridas. Este tipo de cargas fornece correntes com harmónicas, tendo estas uma frequência mais elevada do que a fundamental. A identificação destas harmónicas teve de ser feita com o analisador Fluke1760. Neste caso, as tensões apresentaram valores diferentes de modo a compensar o desequilíbrio da carga embora não seja o suficiente para manter as correntes todas iguais. Em relação ao conteúdo harmónico obtido nas duas situações e atendendo os limites impostos pela norma portuguesa EN50160, verificou-se que a taxa de distorção harmónica de corrente apresenta valores acima dos 20%. A harmónica de 3ª ordem apresenta valor maior do que o valor máximo do limite que é de 15% na situação da utilização dos circuitos de iluminação dos LEDs, sendo que a distorção harmónica total da tensão apresenta valores abaixo dos 8%.

As consequências do aumento do conteúdo harmónico da forma de ondas das tensões e correntes, o valor do Factor K foi elevado, ou seja, reduziu a potência aparente máxima que o transformador consegue fornecer, o desvio padrão cerca de 5.4%. Por outro lado, verificou-se também a redução da capacidade de fornecimento da energia ativa até 18.2%, por causa do baixo factor de potência cerca do 0.72. Este é um valor relativamente bastante abaixo do valor mínimo do factor de potência limite imposto de forma a garantir que a energia reativa não exceda os 30% da energia ativa, nas horas fora de vazio da análise da faturação em vigor, sendo que o factor desejado é igual a 0,96.

Quanto à estratégia de especificar e escolher os condensadores a serem utilizados para elevar o fator de potência, foi utilizado o *software* Circutor, i.e., um programa relativamente simples e que fornece um gráfico dos consumos anuais da instalação, tal como fornece a poupança potencial. Neste trabalho o condensador proposto permite uma poupança que pode chegar a 30% da fatura total da electricidade. Neste sentido recomenda-se também utilizar outro *software* o ALTOFP cujo fluxograma é mostrado no Anexo C.

No entanto, é importante ter em consideração que uma das possíveis consequências, causadas pelos condensadores, é a produção harmónicas. Esse facto faz com que a reactância capacitiva diminua com o aumento da frequência, provocando o aumento das perdas e o consequente aquecimento e diminuição do tempo de vida útil do condensador, levando também a um eventual risco. A proposta alternativa mais provável foi a colocação de filtros passivos, sintonizados com a frequência das harmónicas de maior amplitude, cuja é igual a 150Hz. O filtro activo paralelo também um opção muito eficaz de forma a conseguir diminuir o Factor-K do transformador, além disso estes equipamentos podem passar de uma corrente com THD perto dos 100% para uma corrente com THD inferior a (4% - 5%). No entanto, por causa do valor da frequência das harmónicas de maior amplitude ser igual a 150Hz, por isso o filtro activo em termos económicos não é eficiente.

Fazendo uma análise global sobre todo o trabalho realizado, pode concluir-se que foram atingidos os principais objectivos propostos. O investimento em equipamentos de baixa potência tendo em vista a solução dos problemas de qualidade de energia eléctrica resultante das harmónicas pode pagar-se em poucos anos, mesmo que se contabilizem apenas as perdas nos transformadores e condutores do sistema de alimentação da indústria. Muitos dos problemas de qualidade de energia podem fazer com que alguns equipamentos funcionem de forma incorrecta e levar à interrupção de processos de fabrico com prejuízos muito elevados. Tais problemas podem ser resolvidos quando as suas causas são identificadas e se adoptam as medidas apropriadas para a sua correcção.

A utilização de cargas não lineares, que absorvem correntes harmónicas e de componentes que compõem as redes eléctricas que contêm uma impedância não desprezável, provocam quedas de tensão que conduzem à distorção harmónica da tensão. As fontes de alimentação de equipamentos electrónicos, lâmpadas LED e transformadores em regime de saturação, são exemplos de cargas não lineares que podem originar uma distorção harmónica. Repare-se que no mundo actual tem-se um número crescente de cargas não lineares e consequentemente a distorção harmónica.

8.2. Limitações e proposta de trabalho futuro

À semelhança de qualquer outro trabalho desta natureza, esta dissertação apresenta limitações. Com os resultados obtidos foi possível consolidar a importância da correção do factor de potência de sistemas de iluminação pública, na diminuição dos consumos energéticos, bem como na melhoria da qualidade de energia elétrica.

Poderíamos melhorar o trabalho com os resultados obtidos se utilizarmos outras ferramentas que dariam resultados mais firmes; tais como o analisador Fluke 434 Series II, que utiliza um calculador de perdas para medir os custos ligados diretamente à baixa qualidade de energia elétrica.

Neste trabalho tentou-se fazer avaliação económica para apenas uma das propostas (os condensadores), seria importante fazer o estudo de viabilidade financeira e económica de implementar um filtro passivo sintonizado com a frequência verificada nesta dissertação 150Hz, permitindo, deste modo, verificar as diferenças entre estes dois cenários, no que respeita à análise quantitativa bem como à análise qualitativa. De referir ainda que neste trabalho não se teve em consideração os custos de manutenção, custos com outros materiais, custos de mão-de-obra, etc.

Por último seria importante ter em conta que o LED é ainda considerado uma tecnologia emergente pelo que muito desenvolvimento tem sido feito não só em relação à evolução do próprio dispositivo, mas também em relação às técnicas de alimentação.

Reconhecimento

- Desde o primeiro dia que comecei o meu estágio na EDP, tenho visitado algumas centrais, tais como, central de Penide 15 kV, central da Caniçada 150 kV, e o parque eólico de serra da cabreira 15 kV. Visitei Windfloat da Aguçadoura que injecta 15 kV no PTS-PVZ-124. Visitei também as subestações de energia eléctrica AT/MT, como por exemplo S.Martinho de Dume, Braga, Lamações, Fonte Boa, e Penide 60/15 kV, bem como, postos de transformação PT's e PTS's, por exemplo PT-BRG-16; 23; 36; 87; 520; 572; 694; 696; PT-EPS 005; 45; PT-BCL 22; PT-TBR 31, PTS-BRG 174; 256; 309; 376; 677; 694; 856; 857 e PTS-EPS 100. *O PTS-BRG-309* que se considera neste trabalho o PAC (ponto de acoplamento comum). Também tenho identificado armários de PT's tipo AS, AI¹² e R100 e R250 kVA¹³. Visitei CA e CB e cabine subterrânea. E identifico QGBT's tipo BTR, CAI, CAII e R630 kVA. Gostaria de dizer que toda informação adquirida me tem ajudado a ganhar experiência e prática; tenho registro fotográfico das visitas realizadas que ia apresentar para me ajudar concretizar o meu objetivo.

- O Grupo de Electrónica de Potência e Energia (GEPE) do Centro Algoritmi da Universidade do Minho, estando a par dos problemas atuais, tem desenvolvido soluções que permitem mitigar vários problemas de QEE. Nesse contexto, o grupo tem know-how e competências no desenvolvimento de:
 - Filtros Ativos;
 - Sistemas de monitorização da QEE;
 - Sistemas de carregamento de baterias;
 - Interface de sistemas de energia renovável com a rede eléctrica;
 - Electrónica de potência para veículos eléctricos e híbridos.

¹² PT tipo AI: Aéreo superior > 100 kVA, PT tipo AS: Aéreo <100 kVA

¹³ Recentemente foram aprovados por despacho de 18 de Junho de 2009, os projectos-tipo dos posto de transformação aéreo, com transformador de potência até 100 kVA para o tipo R100, e com transformador de potência entre 160 kVA e 250 kVA para o tipo R250, referidos em epígrafe AS e AI respectivamente.

Shine on

Entre alunos de mestrado, investigadores e empreendedores foram 45 os que marcaram presença no fim de semana Productize.it, que decorreu de 3 a 5 de junho, na Fábrica STARTUPS, em Lisboa. Eu fui seleccionada para participar nesse grande evento com a proposta da minha tese. O Productize.it é um evento de aceleração de start-ups de hardware que tem como objetivo ajudar empreendedores a transformar ideias em protótipos funcionais e levá-los para o mercado, e começarem um negócio baseado nos seus projetos e pesquisa académica tendo como temas preponderantes Internet of Things, Smart Cities, Energia e Clean Tech.

Os 45 participantes, organizados em treze equipas, competíamos na primeira fase do Productize.it por um lugar no pódio. A minha equipa chamava-se Harmo.Light, e a minha responsabilidade foi como o CEO.

No fim de semana a equipa da Productized e um grupo de mentores e especialistas ajudaram nós a construir equipas em torno dos projetos mais relevantes, para trabalhar no seu enquadramento dentro do mercado, definir um modelo de negócios e o público-alvo, bem como um produto de hardware e preparar um protótipo durante



A semana de prototipagem, de 16 a 23 de julho, destina-se a apoiar os projetos vencedores, mencionou o mentor. Entre estes estão o *InPack*, que "consiste numa tecnologia de monitorização de bebés e de todo o processo de descanso diários para ajudar os pais". O segundo lugar foi para uma mala convertível em mochila, "uma tecnologia patenteável e um produto cujo interesse foi demonstrado por entidades especializadas". O terceiro lugar coube a um projeto de retificação de lâmpadas led, "que causam muita distorção na rede elétrica". Por sua vez, o projeto de *scanning 3D* mereceu uma menção honrosa e "permite fazer o *scanning* corporal e verificar se a roupa serve às pessoas", frisou André Marquet.

É muita a expectativa que esta semana de prototipagem está a gerar. Os participantes poderão encontrar aqui

Productize.it
Levar as start-ups mais longe

Entre alunos de mestrado, investigadores e empreendedores foram 45 os participantes que marcaram presença no fim de semana "Productize.it", que decorreu de 3 a 5 de junho, na Fábrica STARTUPS, em Lisboa. Segue-se a semana de prototipagem, que vai ter lugar de 16 a 23 de julho.

"Tivemos pessoas da área de indústria e estrangeiros, tendo o programa assumido uma dimensão internacional", afirmou o responsável pelo programa, André Marquet, que considera que o evento "superou as expectativas".

O "Productize.it" convidou os alunos de engenharia a criar uma ideia de negócio com o intuito de iniciarem uma start-up. Este programa de pré-aceleração quer ajudar participantes a começarem um negócio baseado nos seus projetos e pesquisa académica tendo como temas preponderantes *Internet of Things*, *Smart Cities*, *Energia e Clean Tech*.

No fim de semana a equipa da Productized e um grupo de mentores e especialistas ajudaram os participantes a construir equipas em torno dos projetos mais relevantes, para trabalhar no seu enquadramento dentro do mercado, definir um modelo de negócios e o público-alvo, bem como um produto de *hardware*, e preparar um protótipo. Tudo, ao longo de 54 horas.

o aval necessário para a construção de uma primeira versão funcional dos seus produtos, para a avaliação da viabilidade dos projetos e a sua implementação no mercado ou pré-mercado. Apesar de poderem não ter a roupa final, estes projetos farão funcionalmente o que se espera como resultado final", admitiu André Marquet. A Productized, os parceiros e os mentores do programa vão disponibilizar todas as ferramentas, materiais e assistência técnica necessárias.

Por sua vez, um painel de investidores e capitais de risco vão avaliar os 10 melhores projetos para que possam ser financiados. No final da semana, durante um *Demo Day*, cada equipa apresentará o seu produto e plano de negócios. Os três melhores projetos receberão 5000€, 2000€ e 1000€ em dinheiro, respetivamente.

// www.productize.it

Harmo.Light convenceu o júri e ganhou o terceiro lugar. E estamos motivados para a segunda fase. À semana de prototipagem, teve lugar de 16 a 23 de julho.

A revista *i9 magazine* publicada em Julho 2016 escreveu um artigo sobre o prémio que nós foi atribuído.

Referências Bibliográficas

- [1] R. C. Dugan, S. Santoso, M. F. McGranaghan, and H. W. Beaty— *Electrical Power Systems Quality*. McGraw-Hill, 2002.
- [2] TURNER. C.Wayne, DOTY Steve —*Energy Management Handbook*, 6th Edition.Pg. 368. 2006.
- [3] <http://www.pordata.pt/Home>
- [4] EDP Distribuição, AMORIM António, whorkshop eficiência energética na iluminação, *Novas Tecnologias na Iluminação Pública*, 16 de Fevereiro de 2009.
- [5] EDP Distribuição, *Relatório e contas*, 2015.
- [6] INE – Instituto Nacional de Estatística: <http://www.ine.pt>
- [7] EDP Distribuição, *Manual de Iluminação Publica*, Volumes 1, 2 e 3. ISR – UC, 2010.
- [8] COPEL companhia paranaense de energia, *Manual de iluminação pública*, Fevereiro 2012.
- [9] TEIXEIRA Armínio, *Tipos de Lâmpadas*, FEUP.
- [10] WANDERLEY C. Thiago, Revista online IPOG Especialize, *A evolução das lâmpadas e a grande revolução dos LEDs*, Belém, 2014.
- [11] EDP Distribuição, Acção de Formação Interna (Produtividade +), *Iluminação pública*, Coimbra, Março 2007.
- [12] EDP Distribuição, CARREIRA G. J. Pedro, *Street and Area Lighting Conference Relatório Crítico*.
- [13] LOPES B. Leonardo, *Uma avaliação da tecnologia led na iluminação pública*, Rio de Janeiro, Fevereiro de 2014.
- [14] MOREIRA S. F. João, *Circuito para comando de lâmpadas de indução*, Novembro 2014.
- [15] PIRES F. C. M. Vitor, *Novas Topologias de Conversores de Potência com Controlo Inteligente*, Escola Superior de Tecnologia de Setúbal.
- [16] Engcomp LTDA, FRANCO Edgard, *Qualidade de Energia - Causas, Efeitos e Soluções*, março de 2008. [Online] disponível em: <http://docslide.com.br/documents/qualidade-de-energia-causas-efeitos-e-solucoes.html>
- [17] H. Moreno, *Harmónicas nas Instalações Eléctricas*, Instituto Brasileiro do Cobre, 2001.
- [18] M. R. Araujo and S. R. Naidu, *Sistema Computadorizado para Monitoramento de Harmónicos em Sistemas Eléctricos*.

- [19] Schneider Electric, workshop Instalações elétricas de baixa tensão, *Qualidade de energia Harmônicas*.
- [20] H.Z.Azazi, E. E. EL-Kholy, S.A.Mahmoud, S.S.Shokralla, *Review of Passive and Active Circuits for Power Factor Correction in Single Phase, Low Power AC-DC Converters*, Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON 10), Cairo University, Egypt, December 19-21, 2010, Paper ID 154.
- [21] DESMET Jan, Hogeschool West-Vlaanderen & DELAERE Gregory, Labo Lemcko, Power Quality Application Guide, *Harmonics Selection and Rating of Transformers*, November 2005.
- [22] GalpEnergia, *Compensação do Factor de Potência*. [online] disponível em: <http://www.galpennergia.com/PT/ProdutosServicos/Eletricidade-Gas-Natural-Livre/Industria/Documents/Compensacao-do-Factor-Potencia.pdf>
- [23] C. Felgueiras, A. Fidalgo, C. Viegas, and C. Petry, *High order experimental skills ' gap identification – need for reshape electronics teaching*, *Tecnol. Apl. a la Ensen. la Electron.* (Technologies Appl. to Electron. Teaching), pp. 1 – 6, 2014.
- [24] A. Pires, *Caracterização de harmónicos causados por equipamentos eletroeletrónicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia Referências 96 Departamento de Electrónica Industrial eléctrica*, UFMG Dissertação, 2006.
- [25] S. Uddin, H. Shareef, A. Mohamed, and M. A. Hannan, *Investigation of harmonic generation from low wattage led lamps*, *J. Appl. Sci. Res.*, vol. 8, no. 8, pp. 4215– 4221, 2012.
- [26] ISEL, *Espectro de sinais periódicos A Série de Fourier* Comunicações, 11 Março 2010.
- [27] SUHETT R. Marcos, *Análise de técnicas de medição de potência reativa em medidores eletrónicos*, março de 2008.
- [28] Revista Voltium – Revista do Núcleo Estudantil do IEEE da Universidade do Minho Edição de 2000, pp. 26-31.
- [29] EDP Distribuição, *Relatório e Contas*, 2015.
- [30] Museu da lâmpada. [online] disponível em: www.museudalampada.com.br/incandescentes
- [31] SILVA S. M. A. Diogo, *Medidas de Eficiência Energética em Redes de IP*, FEUP, 2014.
- [32] PERRY Jeff, *Optimizing LED Lighting Systems for Efficiency, Size and Cost*, Power Electronics Technology, January 2011.
- [33] DOE. [online] disponível em: <http://breakingenergy.com/2015/11/17/6-charts-that-will-make-you-optimistic-about-americas-clean-energy-future>

- [34] IJAREEIE, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, *LED Powered Intelligent Street Lighting System with Automatic Brightness Adjustment Based On Climatic Conditions and Vehicle Movements*, Vol. 3, Special Issue 2, April 2014.
- [35] Schröder – Iluminação SA: www.schreder.pt
- [36] Fluke Corporation, *Fluke1760 Power Quality Recorder, user's manual*, June 2006.
- [37] EDP Distribuição, *Qualidade de serviço- Analisador de rede FLUKE 1760*.
- [38] Fluke, *Fluke 434 / 435 User Manual*, April. 2008.
- [39] Elspec, *G4430 BLACKBOX PQA*. [Online]. disponível em: <http://www.elspecltd>.
- [40] EDP Distribuição, *Relatório e Contas*, 2014.
- [41] Schröder, *Owlet, control inteligente para iluminação eficiente*
- [42] J. A. Pomilio, *Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica*.
- [43] J. Radatz, *The IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms*, 6th ed. New York, NY, USA: IEEE Standards Office, 1997.
- [44] M. H. Bollen and I. Gu, *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. John Wiley & Sons, 2006.
- [45] D. Coll-Mayor, J. Pardo, and M. Perez-Donsion, *Methodology based on the value of lost load for evaluating economical losses due to disturbances in the power quality*, Energy Policy, vol. 50, pp. 407–418, 2012.
- [46] European Copper Institute, Leonardo Energy, *Voltage Characteristics of Electricity*, Março 2013. [Online] disponível em: http://www.leonardo-energy.org/sites/leonardo-energy/files/documents-and-links/Cu0147_AN_EN50160_v1_0.pdf
- [47] Norma Portuguesa EN 50160, *Características da tensão fornecida pelas redes de distribuição pública de energia eléctrica*.
- [48] A. De Almeida, L. Moreira, and J. Delgado, *Power quality problems and new solutions*. Department of Electrical and Computer Engineering University of Coimbra, pp. 1–9, 2003.
- [49] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes, *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. Wiley, 2007.
- [50] P. Pillay and M. Manyage, *Definitions of voltage unbalance*, IEEE Power Eng. Rev., vol. 22, no. 11, pp. 49–50, 2002.
- [51] EDP, *Distorção harmónica na rede de distribuição*, 2012.
- [52] CENELEC NE/EN 50160: *Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution*, Nov. 1994.

- [53] IEEE STANDARD 519-1992: *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, 1992.
- [54] EDP-D, RNAE, Documento de Referência, *Eficiência Energética na Iluminação Pública*, Janeiro de 2011
- [55] Tabors Caramanis Rudkevich (TCR), New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA) and New York State Department of Public Service, *White Paper on Developing Competitive Electricity Markets and Pricing Structures*, April 2016.
- [56] Ignacio J. Pérez-Arriaga, Scott Burger, and Tomás Gómez, MIT Center for Energy and Environmental Policy Research, *Electricity Services in a More Distributed Energy System*. March 2016.
- [57] Przegląd elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 11/2013.
- [58] N. Mohan, T. M. Undeland e W. P. Robbins: *Power Electronics, Converters, Applications and Design*, 2nd Edition, John Willey & Sons, Página 212, USA, 1994.
- [59] J. Afonso, J. Sepúlveda, and J. Martins, "Filtros Activos de Potência para Melhoria da Qualidade de Energia Eléctrica", Universidade do Minho, 2000.
- [60] Revista Técnico-Científica |Nº7| Julho de 2011. <http://www.neutroaterra.blogspot.com>.
- [61] J. A. Maia and J. R. Pinheiro, *Harmônicos de Corrente e Tensão*, Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, 2006.

Anexos

Anexo A

Folhas de especificação

Supertex inc.

HV9910

Universal High Brightness LED Driver

Features

- ▶ >90% Efficiency
- ▶ 8V to 450V input range
- ▶ Constant-current LED driver
- ▶ Applications from a few mA to more than 1A Output
- ▶ LED string from one to hundreds of diodes
- ▶ PWM Low-Frequency Dimming via Enable pin
- ▶ Input Voltage Surge ratings up to 450V

Applications

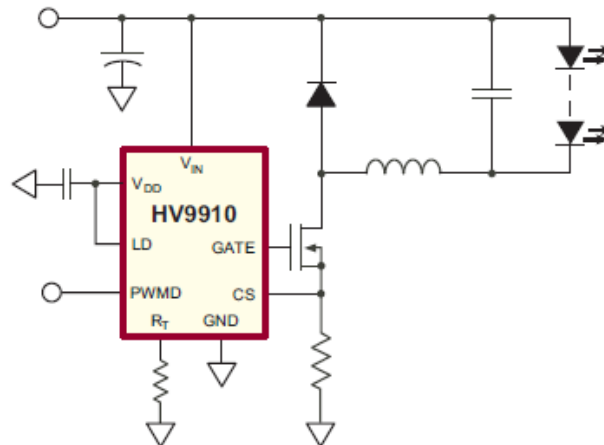
- ▶ DC/DC or AC/DC LED Driver applications
- ▶ RGB Backlighting LED Driver
- ▶ Back Lighting of Flat Panel Displays
- ▶ General purpose constant current source
- ▶ Signage and Decorative LED Lighting
- ▶ Automotive
- ▶ Chargers

General Description

The HV9910 is a PWM high-efficiency LED driver control IC. It allows efficient operation of High Brightness (HB) LEDs from voltage sources ranging from 8VDC up to 450VDC. The HV9910 controls an external MOSFET at fixed switching frequency up to 300kHz. The frequency can be programmed using a single resistor. The LED string is driven at constant current rather than constant voltage, thus providing constant light output and enhanced reliability. The output current can be programmed between a few milliamps and up to more than 1.0A.

The HV9910 uses a rugged high voltage junction isolated process that can withstand an input voltage surge of up to 450V. Output current to an LED string can be programmed to any value between zero and its maximum value by applying an external control voltage at the linear dimming control input of the HV9910. The HV9910 provides a low-frequency PWM dimming input that can accept an external control signal with a duty ratio of 0-100% and a frequency of up to a few kilohertz.

Typical Application



IRS254(0,1)(S)PbF

LED BUCK REGULATOR CONTROL IC

Description

The IRS254(0,1) are high voltage, high frequency buck control ICs for constant LED current regulation. They incorporate a continuous mode time-delayed hysteretic buck regulator to directly control the average load current, using an accurate on-chip bandgap voltage reference.

The application is inherently protected against short circuit conditions, with the ability to easily add open-circuit protection. An external high-side bootstrap circuit drives the buck switching element at high frequencies. A low-side driver is also provided for synchronous rectifier designs. All functions are realized within a simple 8 pin DIP or SOIC package.

Features

- 200 V (IRS2540) and 600 V (IRS2541) half bridge driver
- Micropower startup (<500 μ A)
- $\pm 2\%$ voltage reference
- 140 ns deadtime
- 15.6 V zener clamp on V_{CC}
- Frequency up to 500 kHz
- Auto restart, non-latched shutdown
- PWM dimmable
- Small 8-Lead DIP/8-Lead SOIC packages

Packages

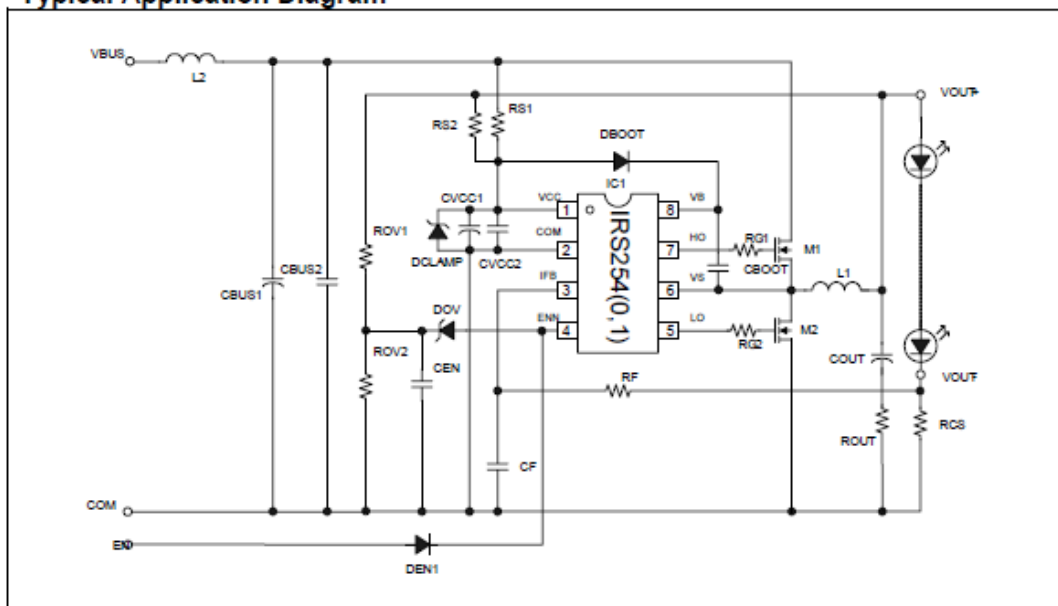


8-Lead PDIP
 IRS254(0,1)PbF



8-Lead SOIC
 IRS254(0,1)SPbF

Typical Application Diagram



NCP1200

PWM Current-Mode Controller for Low-Power Universal Off-Line Supplies

Housed in SOIC-8 or PDIP-8 package, the NCP1200 represents a major leap toward ultra-compact Switchmode Power Supplies. Due to a novel concept, the circuit allows the implementation of a complete offline battery charger or a standby SMPS with few external components. Furthermore, an integrated output short-circuit protection lets the designer build an extremely low-cost AC-DC wall adapter associated with a simplified feedback scheme.

With an internal structure operating at a fixed 40 kHz, 60 kHz or 100 kHz, the controller drives low gate-charge switching devices like an IGBT or a MOSFET thus requiring a very small operating power. Due to current-mode control, the NCP1200 drastically simplifies the design of reliable and cheap offline converters with extremely low acoustic generation and inherent pulse-by-pulse control.

When the current setpoint falls below a given value, e.g. the output power demand diminishes, the IC automatically enters the skip cycle mode and provides excellent efficiency at light loads. Because this occurs at low peak current, no acoustic noise takes place.

Finally, the IC is self-supplied from the DC rail, eliminating the need of an auxiliary winding. This feature ensures operation in presence of low output voltage or shorts.

Features

- No Auxiliary Winding Operation
- Internal Output Short-Circuit Protection
- Extremely Low No-Load Standby Power
- Current-Mode with Skip-Cycle Capability
- Internal Leading Edge Blanking
- 250 mA Peak Current Source/Sink Capability
- Internally Fixed Frequency at 40 kHz, 60 kHz and 100 kHz
- Direct Optocoupler Connection
- Built-in Frequency Jittering for Lower EMI
- SPICE Models Available for TRANSient and AC Analysis
- Internal Temperature Shutdown
- Pb-Free Packages are Available

Typical Applications

- AC-DC Adapters
- Offline Battery Chargers
- Auxiliary/Ancillary Power Supplies (USB, Appliances, TVs, etc.)



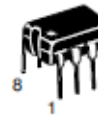
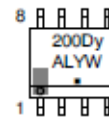
ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>

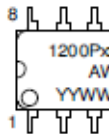
MARKING DIAGRAMS



SOIC-8
D SUFFIX
CASE 751

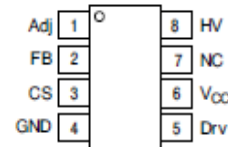


PDIP-8
P SUFFIX
CASE 626



- xxx = Device Code: 40, 60 or 100
- Y = Device Code:
4 for 40
6 for 60
1 for 100
- A = Assembly Location
- L = Wafer Lot
- Y, YY = Year
- W, WW = Work Week
- G, * = Pb-Free Package

PIN CONNECTIONS



(Top View)

ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 14 of this data sheet.

NCP1010, NCP1011, NCP1012, NCP1013, NCP1014

Self-Supplied Monolithic Switcher for Low Standby- Power Offline SMPS

The NCP101X series integrates a fixed-frequency current-mode controller and a 700 V MOSFET. Housed in a PDIP-7, PDIP-7 Gull Wing, or SOT-223 package, the NCP101X offers everything needed to build a rugged and low-cost power supply, including soft-start, frequency jittering, short-circuit protection, skip-cycle, a maximum peak current setpoint and a Dynamic Self-Supply (no need for an auxiliary winding).

Unlike other monolithic solutions, the NCP101X is quiet by nature: during nominal load operation, the part switches at one of the available frequencies (65 – 100 – 130 kHz). When the current setpoint falls below a given value, e.g. the output power demand diminishes, the IC automatically enters the so-called skip-cycle mode and provides excellent efficiency at light loads. Because this occurs at typically 1/4 of the maximum peak value, no acoustic noise takes place. As a result, standby power is reduced to the minimum without acoustic noise generation.

Short-circuit detection takes place when the feedback signal fades away, e.g. in true short-circuit conditions or in broken Optocoupler cases. External disabling is easily done either simply by pulling the feedback pin down or latching it to ground through an inexpensive SCR for complete latched-off. Finally soft-start and frequency jittering further ease the designer task to quickly develop low-cost and robust offline power supplies.

For improved standby performance, the connection of an auxiliary winding stops the DSS operation and helps to consume less than 100 mW at high line. In this mode, a built-in latched overvoltage protection prevents from lethal voltage runaways in case the Optocoupler would brake. These devices are available in economical 8-pin dual-in-line and 4-pin SOT-223 packages.

Features

- Built-in 700 V MOSFET with Typical $R_{DS(on)}$ of 11 Ω and 22 Ω
- Large Creepage Distance Between High-Voltage Pins
- Current-Mode Fixed Frequency Operation: 65 kHz – 100 kHz – 130 kHz
- Skip-Cycle Operation at Low Peak Currents Only: No Acoustic Noise!
- Dynamic Self-Supply, No Need for an Auxiliary Winding
- Internal 1.0 ms Soft-Start
- Latched Overvoltage Protection with Auxiliary Winding Operation
- Frequency Jittering for Better EMI Signature

- Auto-Recovery Internal Output Short-Circuit Protection
- Below 100 mW Standby Power if Auxiliary Winding is Used
- Internal Temperature Shutdown
- Direct Optocoupler Connection
- SPICE Models Available for TRANsient Analysis
- Pb-Free Packages are Available

Typical Applications

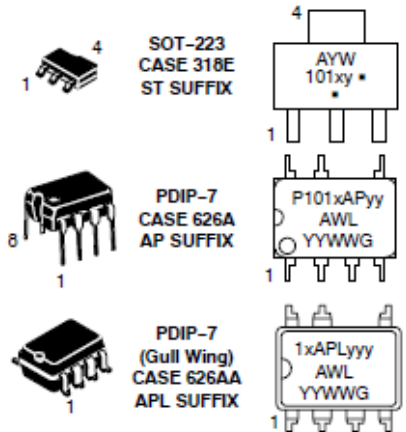
- Low Power AC/DC Adapters for Chargers
- Auxiliary Power Supplies (USB, Appliances, TVs, etc.)



ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>

MARKING DIAGRAMS



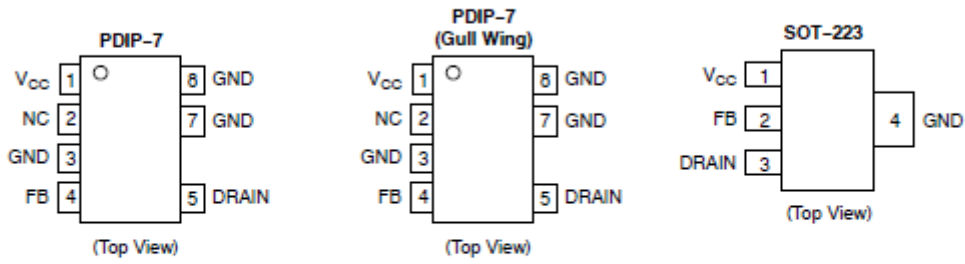
- x = Current Limit (0, 1, 2, 3, 4)
- y = Oscillator Frequency
A (65 kHz), B (100 kHz), C (130 kHz)
- yy = 06 (65 kHz), 10 (100 kHz), 13 (130 kHz)
- yy = 065, 100, 130
- A = Assembly Location
- WL, L = Wafer Lot
- YY, Y = Year
- WW, W = Work Week
- * or G = Pb-Free Package
(Note: Microdot may be in either location)

ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 21 of this data sheet.

NCP1010, NCP1011, NCP1012, NCP1013, NCP1014

PIN CONNECTIONS



Indicative Maximum Output Power from NCP1014

R _{DS(on)} - I _p	230 Vac	100 - 250 Vac
11 Ω - 450 mA DSS	14 W	6.0 W
11 Ω - 450 mA Auxiliary Winding	19 W	8.0 W

1. Informative values only, with: T_{amb} = 50°C, F_{switching} = 65 kHz, circuit mounted on minimum copper area as recommended.

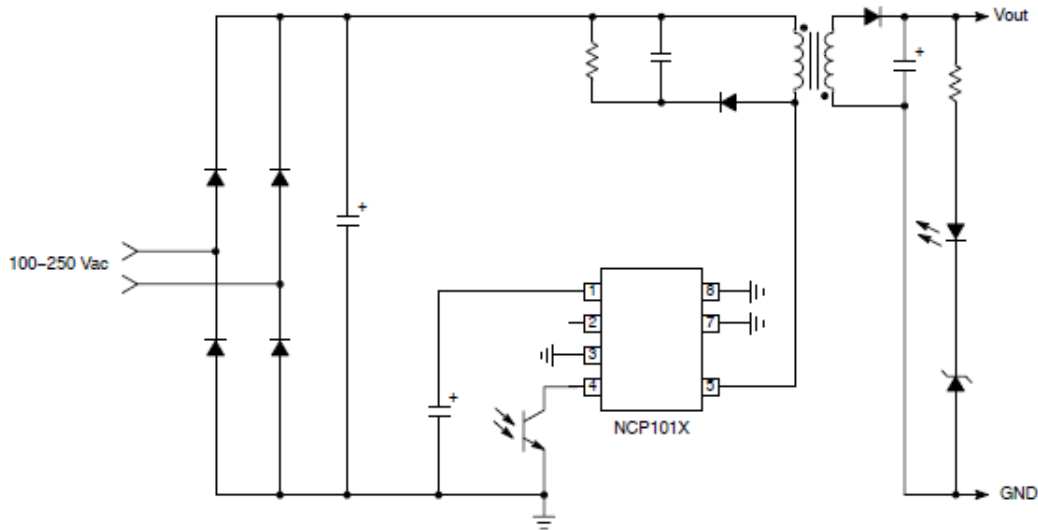


Figure 1. Typical Application Example

Quick Selection Table

	NCP1010			NCP1011			NCP1012			NCP1013			NCP1014	
R _{DS(on)} [Ω]	22						11							
I _{peak} [mA]	100			250			250			350			450	
Freq [kHz]	65	100	130	65	100	130	65	100	130	65	100	130	65	100

NCP1015

Self-Supplied Monolithic Switcher for Low Standby-Power Offline SMPS

The NCP1015 integrates a fixed-frequency current-mode controller and a 700 V voltage MOSFET. Housed in a PDIP-7 or SOT-223 package, the NCP1015 offers everything needed to build a rugged and low-cost power supply, including soft-start, frequency jittering, short-circuit protection, skip-cycle, a maximum peak current set-point and a Dynamic Self-Supply (no need for an auxiliary winding).

Unlike other monolithic solutions, the NCP1015 is quiet by nature: during nominal load operation, the part switches at one of the available frequencies (65–100 kHz). When the current set-point falls below a given value, e.g. the output power demand diminishes, the IC automatically enters the so-called skip cycle mode and provides excellent efficiency at light loads. Because this occurs at typically 0.25 of the maximum peak value, no acoustic noise takes place. As a result, standby power is reduced to the minimum without acoustic noise generation.

Short-circuit detection takes place when the feedback signal fades away e.g. un-true short-circuit or is broken optocoupler cases. Finally soft-start and frequency jittering further ease the designer task to quickly develop low-cost and robust offline power supplies.

For improved standby performance, the connection of an auxiliary winding stops the DSS operation and helps to consume less than 100 mW at high line.

Features

- Built-in 700 V MOSFET with typical $R_{DS(on)}$ of 11 Ω
- Large Creepage Distance between High-voltage Pins
- Current-mode Fixed Frequency Operation: 65 kHz - 100 kHz
- Skip-cycle Operation at Low Peak Currents Only: No Acoustic Noise!
- Dynamic Self-Supply, No Need for an Auxiliary Winding
- Internal 1 ms Soft-start
- Auto-recovery Internal Output Short-circuit Protection
- Frequency Jittering for Better EMI Signature
- Below 100 mW Standby Power if Auxiliary Winding is Used
- Internal Temperature Shutdown
- Direct Optocoupler Connection
- SPICE Models Available for TRANSient and AC Analysis
- This is a Pb-Free Device

Typical Applications

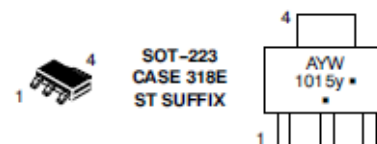
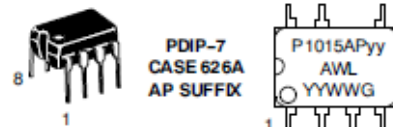
- Low Power ac-dc Adapters for Chargers
- Auxiliary Power Supplies (USB, Appliances, TVs, etc.)



ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>

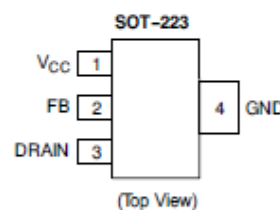
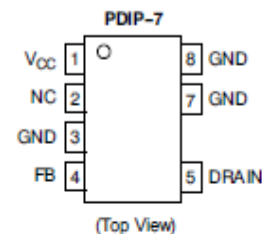
MARKING DIAGRAMS



yy = 06 (65 kHz), 10 (100 kHz)
 y = A (65 kHz), B (100 kHz)
 A = Assembly Location
 WL = Wafer Lot
 YY = Year
 WW = Work Week
 G or • = Pb-Free Package

(Note: Microdot may be in either location)

PIN CONNECTIONS



ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 20 of this data sheet.

Anexo B

De modo a estudar o impacto dos LEDs em alguns dos indicadores de qualidade de energia eléctrica constrói-se a tabela seguinte que apresenta os componentes harmónicas da corrente.

Fase 1					Fase 2				
I_{rms} (A)	I_{rms}^2	$I_h^2 \times h$	$I_h^2 \times h^2$	I_{rms} (A)	I_{rms}^2	$I_h^2 \times h$	$I_h^2 \times h^2$	I_{rms} (A)	I_{rms}^2
88,68	78,16	78,16	78,16	79,85	28,03	28,03	28,03	5,69	96,39
11,26	1,26	3,78	11,34	15,74	1,09	3,27	9,81	0,74	12,53
9,45	0,89	4,44	22,19	8,14	0,29	1,46	7,28	0,62	10,47
7,55	0,57	3,97	27,78	3,29	0,05	0,33	2,33	0,73	12,34
1,88	0,04	0,32	2,84	1,42	0,01	0,08	0,72	0,13	2,23
2,49	0,06	0,68	7,48	1,40	0,01	0,09	1,04	0,23	3,92
1,90	0,04	0,46	6,04	1,03	0,00	0,06	0,79	0,23	3,87
1,08	0,01	0,17	2,60	1,03	0,00	0,07	1,06	0,09	1,50
47,53	0,10	1,78	30,23	0,10	1,55	0,01	3,05	0,27	4,63
81,13	93,76	188,65		29,49	33,57	54,09			
$\sqrt{I_h^2}$	9,01	Error %	9,66	$\sqrt{I_h^2}$	5,43	Error %	18,09	$\sqrt{\sum I_h^2}$	$\sqrt{\sum I_h^2}$

$$\times \frac{1}{25(\text{mm}^2)} = 1,13 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

Anexos C

ALTOFP: Software para dimensionamento de bancos de capacitores para correção do factor de potência. A Figura 1 mostra os triângulos das potências para dois casos de mesma potência ativa entregue a uma carga. Nota-se que $\cos \varphi_2$ será maior do que $\cos \varphi_1$

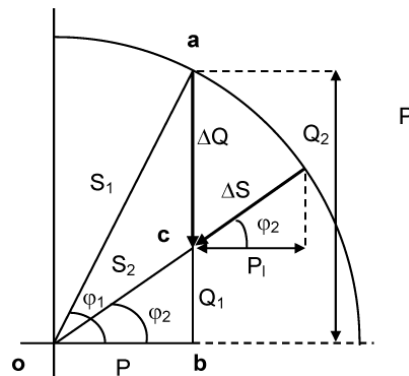


Figura 1 - Triângulos das potências. oab antes, ocb após a correção do factor de potência.

O software ALTOFP, cujo fluxograma é mostrado na Figura 2, pode ser usado para especificar os capacitores a serem usados para elevar o factor de potência.

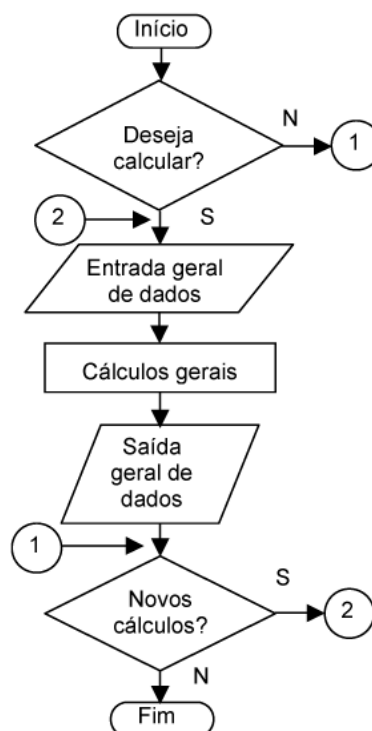


Figura 2 - Fluxograma do software ALTOFP

Descrição do programa

No bloco de entrada de dados, uma tela textual pede que sejam digitados os seguintes dados: Sistema monofásico ou trifásico, tensão de linha U em V, frequência do sistema f em Hz, dez últimos valores de energia ativa em KWh, dez últimos valores de energia reativa KVarh, horas trabalhadas em cada período e o novo factor de potência desejado $\cos\Phi_2$ em notação percentual (recomenda-se $\geq 96\%$).

No bloco de cálculos inicialmente calculam-se os seguintes valores antes da colocação dos capacitores de correção: Média da potência ativa P , dada pela razão entre a energia ativa total no período considerado e o número de horas trabalhadas no período. Média da potência reativa Q_1 dada pela razão entre a energia reativa total no período considerado e o número de horas trabalhadas no período. Média da potência aparente S_1 dada pela equação:

$$S_1 = \sqrt{P^2 + Q_1^2}$$

O factor e o ângulo de potência:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P}{S_1}$$
$$\varphi_1 = \cos^{-1} \left(\frac{P}{S_1} \right)$$

Partindo-se do valor desejado do factor de potência FP_2 , são calculados os novos valores após a colocação do banco de capacitores:

$$\varphi_2 = \cos^{-1}(FP_2)$$

$$Q_2 = P \times \tan \varphi_2$$

$$S_2 = \sqrt{P^2 + Q_2^2}$$

Potência reativa do capacitor, ou do banco de capacitores, e a potência aparente liberada serão dadas por:

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2$$

$$\Delta S = S_1 - S_2$$

Potência ativa liberada P_1 após a colocação do capacitor será dada por:

$$P_1 = \Delta S \times \cos \varphi_2$$

Os valores da corrente total e da capacitância do banco a ser colocado, para sistema monofásico serão dados por:

$$I_2 = \frac{S_2}{U}$$

$$C = \frac{\Delta Q}{6,2832 \times f \times U^2}$$

e para sistema trifásico serão dados por:

$$I_2 = \frac{S_2}{1,7321 \times U}$$

$$C = \frac{\Delta Q}{10,8828 \times f \times U^2}$$

O percentual de potência ativa liberada será dado por:

$$P_1 \% = \% \frac{P_1}{P}$$

No bloco de saída geral de dados é gerado um arquivo onde são apresentados, além dos dados de entrada, os resultados de todos os cálculos efetuados com a especificação do capacitor através do seu valor, sua potência e sua tensão de operação.

Exemplo de aplicação

A Tabela 1 apresenta os dados para um caso fictício de uma instalação para o qual o software ALTOFP foi executado e representa basicamente a interface textual com o operador usada pelo programa. Os valores em negrito significam os dados que o usuário digitou como entrada antes da tecla ENTER.

A Tabela 2 apresenta os dados obtidos após a execução do software utilizando os dados mostrados na Tabela 1 como entradas e corresponde basicamente ao arquivo de saída textual que o programa gera.

Tabela – 1 Exemplo de entrada do programa.

```

CÁLCULO PARA CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA
DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE CAPACITORES

Deseja fazer os cálculos? Digite S(Sim) ou N(Não):
S
Para dados em disco, digite NOMEARQUIVO.DAT:
CORR-FP.DAT
Qual o tipo de sistema? Digite M(Monofásico) ou
T(trifásico)
M
Tensão eficaz da linha (em V):
220
Frequência do sistema (em Hz):
60
Número de medições que serão considerados (N):
10
N últimos valores de kWh, kVArh, horas de trabalho
no formato kWh espaço kVArh espaço horas:
18975 18247 730
19010 18280 730
18930 18230 730
18980 18250 730
18985 18253 730
18900 18200 730
19030 18270 730
18980 18250 730
19060 18300 730
18950 18220 730
Fator de potência desejado após a correção (em %):
93
Deseja calcular novamente? S(Sim) ou N(Não):
N

```

Tabela – 2 Exemplo de saída do programa.

```

CÁLCULO PARA CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA
DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE CAPACITORES

Tensão eficaz do sistema:(V)..... 220
Frequência do sistema:(Hz)..... 60
Potência ativa antes da correção:(kW)..... 26
Potência reativa antes da correção:(kVAR).. 25
Potência aparente antes da correção:(kVA).. 36,07
Fator de potência antes da correção:(%).... 72,08
Corrente na linha antes da correção:(A).... 163,95
Potência ativa depois da correção:(kW)..... 26
Potência reativa depois da correção:(kVAR).. 10,28
Fator de potência depois da correção:(%)... 27,96
Corrente na linha depois da correção:(A)... 93
Potência ativa liberada:(kW)..... 127,08
Potência reativa liberada:(%)..... 7,54
Capacitância do capacitor a ser ligado em paralelo com a carga:(micro F)..... 29,02
Potência reativa do capacitor:(kVAR)..... 806,91
Corrente do capacitor:(A)..... 14,72
Tensão do capacitor:(V)..... 66,91

```

Anexos D



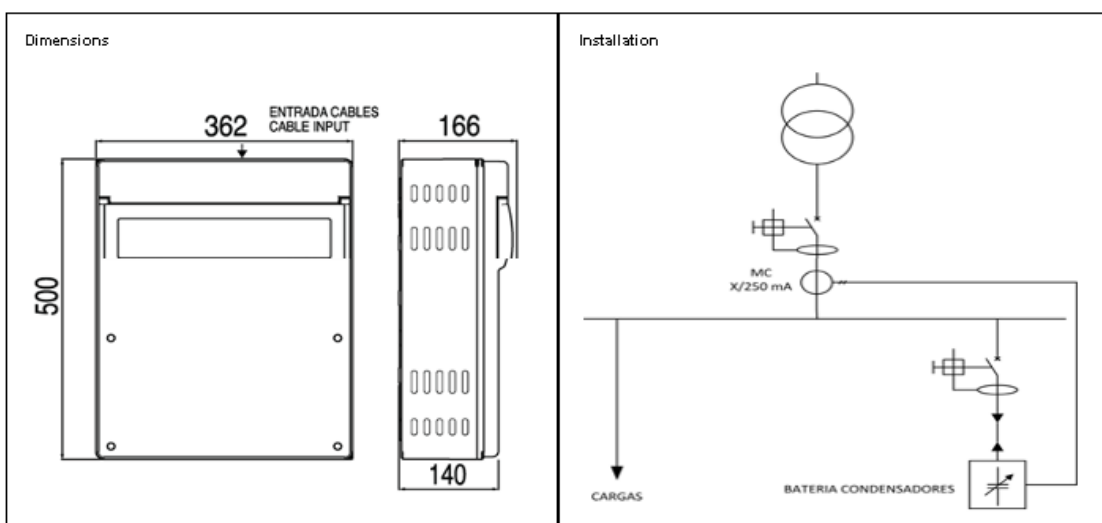
Calculation Ref.: 111

2016

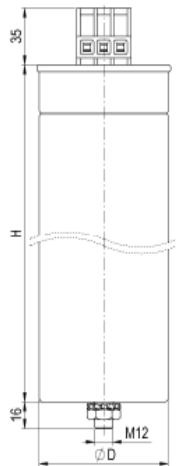
ELECTRICAL FEATURES	
MODEL:	OPTIM 2-7,5-440
CODE:	R3Q761
Rated power:	7.5 kvar
Service voltage power:	6.2 kvar
Rated voltage:	440.0 V
Service voltage:	400 V
Frequency:	50.0 Hz
Isolation level:	690 V
Dielectric strength:	2.5 kV/1 min
Capacitance tolerance:	-5/+10 %
Overload:	1,3xIn
Overvoltage:	1,1xUn (8h to 24h)
	1,15xUn (15 min to 24h)
	1,2xUn (5 min to 24h)
	1,3xUn (1 min to 24h)
Ambient temperature:	-25 °C/+45 °C
Operating temperature:	+ 25 °C (recommended)
Relative humidity:	< 80%
Altitude:	< 2000 msnm
Norms:	IEC 60831; IEC 61921; IEC 60439;IEC 61921;IEC 60439

COMPOSITION	
Composition	2,5+5
Physical steps:	2
Electrical steps:	3
Regulation:	1.2.
Capacitor/s:	Tubular CLZ
Regulator:	-
Options:	-
Switch:	-

MECHANICAL FEATURES	
Wrapper:	Thermoplastic
Dimensions:	362x500x166 mm (ANxALxF)
Weight:	7.0 kg
Installation:	Indoor
Mounting:	Wall
Protection level:	IP 20
Color:	RAL 7035



Low Voltage Power Capacitors
Three-phase: 440 V, 50 Hz, IP 20, MKP



Typ Type	Výkon Power Q_n [kvar]	Kapacita Capacitance C_n [μ F]	Proud Current I_n [A]	Váha Weight [kg]	Rozměry Dimensions $\varnothing D \times H$ [mm]
CSADG 1-0,44/0,4	0,4	3 x 2,2	3 x 0,5	0,6	85 x 175
CSADG 1-0,44/0,5	0,5	3 x 2,7	3 x 0,7	0,6	
CSADG 1-0,44/0,75	0,75	3 x 4,1	3 x 1,0	0,6	
CSADG 1-0,44/0,8	0,8	3 x 4,4	3 x 1,1	0,6	
CSADG 1-0,44/1	1,0	3 x 5,5	3 x 1,3	0,6	
CSADG 1-0,44/1,25	1,25	3 x 6,9	3 x 1,6	0,6	
CSADG 1-0,44/1,5	1,5	3 x 8,2	3 x 2,0	0,6	
CSADG 1-0,44/2	2,0	3 x 11,0	3 x 2,6	0,6	
CSADG 1-0,44/2,5	2,5	3 x 13,7	3 x 3,3	0,6	
CSADG 1-0,44/3	3,0	3 x 16,4	3 x 3,9	0,7	
CSADG 1-0,44/3,15	3,15	3 x 17,3	3 x 4,1	0,7	
CSADG 1-0,44/4	4,0	3 x 21,9	3 x 5,3	0,7	
CSADG 1-0,44/5	5,0	3 x 27,4	3 x 6,6	0,8	
CSADG 1-0,44/6,25	6,25	3 x 34,3	3 x 8,2	0,9	
CSADG 1-0,44/7,5	7,5	3 x 41,1	3 x 9,9	0,9	

Technická data / Technical data:

Teplotní kategorie / Temperature category: -50 / D (max.65°C do 25 kvar vč. / max.60°C nad 25 kvar)
(max 65 °C up to 25 kvar / max 60 °C above 25 kvar)

Vybíjecí odpory / Discharge resistors: 50 V / 1 min

Izolační hladina / Insulation level: 3 / 12 kV

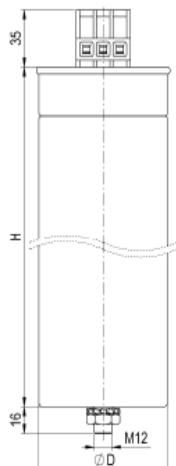
Konstrukce / Design: SH - suché provedení N₂/SH - dry type N₂ non PCB

Norma / Standard: IEC 60831-1:2002

Kreštil	Michalovičová	Dne	28. 6. 2005	Změna	I - Z-15/2013 (teplotní kat.)	29.5.13	V.M.
					J - Z-218/2013 (doplněn typ)	28.11.13	V.M.
Schválil	Falta Vladimír	Dne			K - Z-207/2014 (doplněn typ)	3.9.14	V.F.
					I - Z-25/2014	6.1.15	V.M.

	Název: TECHNICAL SPECIFICATION 440 V, 50 Hz, 3-F, IP20	3J 1848 A I	Sheet
			1 of 2

Low Voltage Power Capacitors
Three-phase: 440 V, 50 Hz, IP 20, MKP



Typ Type	Výkon Power Q_n [kvar]	Kapacita Capacitance C_n [μ F]	Proud Current I_n [A]	Váha Weight [kg]	Rozměry Dimensions $\varnothing D \times H$ [mm]
CSADG 1-0,44/8	8,0	3 x 43,8	3 x 10,5	0,9	85 x 245
CSADG 1-0,44/9	9,0	3 x 49,3	3 x 11,8	1,0	
CSADG 1-0,44/10	10,0	3 x 54,8	3 x 13,1	1,0	
CSADG 1-0,44/12,5	12,5	3 x 68,5	3 x 16,4	1,2	
CSADG 1-0,44/14	14,0	3x 76,7	3 x 18,4	1,2	
CSADG 1-0,44/15	15,0	3 x 82,2	3 x 19,7	1,3	
CSADG 1-0,44/18,2	18,2	3 x 99,7	3 x 23,9	1,9	110 x 245
CSADG 1-0,44/20	20,0	3 x 111	3 x 26,2	1,9	
CSADG 1-0,44/25	25,0	3 x 137	3 x 32,8	2,1	
CSADG 1-0,44/28	28,0	3x 154	3 x 36,8	2,2	136 x 220
CSADG 3-0,44/25	25,0	3x 137	3 x 32,8	2,6	
CSADG 3-0,44/30	30,0	3x 165	3 x 39,4	2,9	

Technická data / Technical data:

Teplotní kategorie / Temperature category: -50 / D (max.65°C do 25 kvar vč. / max.60°C nad 25 kvar)
(max 65 °C up to 25 kvar / max 60 °C above 25 kvar)

Vybíjecí odpory / Discharge resistors: 50 V / 1 min

Izolační hladina / Insulation level: 3 / 12 kV

Konstrukce / Design: SH - suché provedení N₂/SH - dry type N₂ non PCB

Norma / Standard: IEC 60831-1:2002

Kreštil	Michalovičová	Dne	28. 6. 2005	Změna	I - Z-15/2013 (teplotní kat.)	29.5.13	V.M.
					J - Z-218/2013 (doplněn typ)	28.11.13	V.M.
Schválil	Falta Vladimír	Dne			K - Z-207/2014 (doplněn typ)	3.9.14	V.F.
					I - Z-25/2014	6.1.15	V.M.

	Název: TECHNICAL SPECIFICATION 440 V, 50 Hz, 3-F, IP20	3J 1848 A I	Sheet
			2 of 2

TABELA DE PREÇOS

Junho de 2014



EQUIPAMENTOS AUTOMÁTICOS DE CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA - Série RAM - Condensadores 440 V THC* < 40%

Tipo	kVAr 400V	Referência	Escalaões (kVAr)						Relé	Preço
			1°	2°	3°	4°	5°	6°		
RAM 15 (L x P x A) 400x220x400 mm										
	7,5	61RAM1507	2,5	2,5	2,5				NORCONTROL LSA - 5 	440,00 €
	10	61RAM1510	2,5	2,5	5			470,00 €		
	12,5	61RAM1512	2,5	5	5			490,00 €		
	15	61RAM1515	5	5	5			510,00 €		
RAM 30 (L x P x A) 500x240x490 mm										
	10	61RAM3010	5	5				NORCONTROL LSA - 5 	750,00 €	
	12,5	61RAM3012	2,5	5	5				780,00 €	
	15	61RAM3015	5	5	5				790,00 €	
	20	61RAM3020	5	5	10				800,00 €	
	25	61RAM3025	5	10	10				820,00 €	
	30	61RAM3030	5	5	10	10			840,00 €	
RAM 40 (L x P x A) 500x320x600 mm										
	20	61RAM4020	5	5	10			NORCONTROL LSA - 5 	980,00 €	
	25	61RAM4025	5	10	10				1.000,00 €	
	30	61RAM4030	5	5	10	10			1.020,00 €	
	35	61RAM4035	5	10	10	10			1.040,00 €	
	40	61RAM4040	10	10	10	10			1.070,00 €	
RAM 50 (L x P x A) 500x320x600 mm										
	20	61RAM5020	5	5	10			NORCONTROL LSA - 5 	1.070,00 €	
	30	61RAM5030	5	5	10	10			1.080,00 €	
	40	61RAM5040	10	10	10	10			1.130,00 €	
	45	61RAM5045	5	10	10	20			1.170,00 €	
	50	61RAM5050	10	10	10	20			1.200,00 €	
RAM 80 (L x P x A) 500x320x850 mm										
	40	61RAM8040	10	10	20			NORCONTROL LSA - 7 	1.200,00 €	
	50	61RAM8050	10	10	10	10	10		1.520,00 €	
	60	61RAM8060	10	10	10	10	20		1.570,00 €	
	70	61RAM8070	10	10	10	20	20		1.640,00 €	
	80	61RAM8080	10	10	20	20	20		1.710,00 €	
RAM 100 (L x P x A) 500x320x850 mm										
	50	61RAM10050	10	10	10	20		NORCONTROL LSA - 7 	1.570,00 €	
	60	61RAM10060	10	10	10	10	20		1.660,00 €	
	70	61RAM10070	10	10	10	20	20		1.720,00 €	
	80	61RAM10080	10	10	20	20	20		1.800,00 €	
	90	61RAM10090	10	20	20	20	20		1.860,00 €	
	100	61RAM10100	20	20	20	20	20		1.970,00 €	
RAM 120 (L x P x A) 500x320x1150 mm										
	60	61RAM12060	10	10	10	10	20	NORCONTROL LSA - 7 	1.700,00 €	
	70	61RAM12070	10	10	10	20	20		1.750,00 €	
	80	61RAM12080	10	10	20	20	20		1.820,00 €	
	90	61RAM12090	10	20	20	20	20		2.120,00 €	
	100	61RAM12100	20	20	20	20	20		2.180,00 €	
	120	61RAM12110	20	20	20	20	40		2.310,00 €	

*THC - Distorção Harmônica nos Condensadores

A NORCONTROL, informa a possibilidade de outro escalonamento ou potência pretendida, colação sob consulta, reserva-se ainda do direito de alteração destes preços sem aviso prévio.