

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP

**Redução de Consumo Através de Equipamentos de
Regulação de Tensão**

Carlos Manuel de Pinho Nunes

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. Doutor Cláudio Domingos Martins Monteiro
Co-orientador: Prof. Doutor Carlos Manuel de Araújo Sá
Supervisor na empresa: Engenheiro Rui Miguel da Silva Azevedo

Julho 2011

© Carlos Nunes, 2011

Resumo

Nesta dissertação foi realizado um estudo sobre a relação existente entre o consumo em cargas eléctricas e a tensão que lhes é aplicada. Para tal, foram realizados ensaios com diferentes tipos de carga (cargas resistivas, indutivas, capacitivas e electrodomésticos). Nestes ensaios foi feita a variação da tensão de alimentação da carga e verificada a sua potência absorvida. No estudo das cargas foram também analisados aspectos teóricos de modelização do seu comportamento no que se refere à variação da potência com a tensão.

Para estudar o impacto nacional de um conjunto de equipamentos de regulação de tensão foram estudados os perfis de tensão da rede eléctrica, em diversos pontos geográficos e períodos de consumo. Foram criados cenários de consumo de forma a, juntamente com o nível de tensão presente na rede, poder calcular a poupança alcançável com a utilização do regulador. Como existem diferentes possibilidades de fazer a regulação da tensão foram estudados alguns tipos de equipamentos existentes com capacidade para fornecer uma solução de regulação.

Abstract

In this dissertation was done a study of the relationship between the consumption of electricity in electrical charges and voltage that is applied to them. For such, tests have been conducted with different types of load (resistive, inductive, capacitive and appliances loads), in these tests were made varying the voltage of the load and checked their power absorbed. In the study of the loads were also analyzed theoretical modeling's of their behavior in relation to the variation of the power with voltage.

To study the national impact of a set of equipment voltage regulation, we studied the profiles of the network voltage, in different geographic locations and periods of consumption. Consumption scenarios were created in order to, together with the voltage level present on the network, can calculate the savings achievable with the use of the regulator. Because there are different possibilities to make the voltage regulation were studied some types of existing equipment with capacity to provide a regulatory solution.

Agradecimentos

Em primeiro lugar deixo os meus profundos agradecimentos ao Professor Doutor Cláudio Domingos Martins Monteiro pela oportunidade de poder trabalhar sob a sua orientação, pela disponibilidade e entusiasmo que sempre demonstrou ao longo da realização deste trabalho e pelas sugestões para o desenvolvimento do tema.

Ao Professor Doutor Carlos Manuel de Araújo Sá pelo auxílio e disponibilização do equipamento utilizado nos ensaios realizados.

Ao Eng.º Rui Miguel da Silva Azevedo pelo apoio e supervisão dos ensaios efectuados e pela disponibilidade demonstrada em dar apoio ao longo da realização de todo o trabalho.

Por último a todos os meus familiares e amigos que me acompanharam ao longo do meu percurso académico, pela ajuda e motivação em todos os momentos.

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	ix
Lista de figuras	xi
Lista de tabelas	xv
Abreviaturas e Símbolos	xvii
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Motivação	2
1.3. Objectivos.....	3
1.4. Estrutura da Dissertação.....	3
1.5. Equipamentos e Informação	4
Capítulo 2	5
Estado da Arte.....	5
2.1. Variação do Consumo com a Tensão.....	5
2.1.1. Motores	7
2.1.2. Lâmpadas de descarga	8
2.1.3. Lâmpadas incandescentes.....	10
2.1.4. Cargas controladas por termóstatos.....	10
2.1.5. Dispositivos electrónicos	11
2.2. Modelização de Cargas Eléctricas	12
2.2.1. Carga eléctrica	12
2.2.2. Modelização de carga com base em modelos matemáticos	13
2.2.3. Modelização de carga recorrendo a medição directa	17
2.3. Equipamentos de Regulação da Tensão.....	18
2.3.1. Estabilizadores de tensão	18
2.3.2. Reguladores do nível de tensão (eficiência)	24
Capítulo 3	35
Modelização de Cargas	35

3.1. Caracterização do Consumo	35
3.1.1. Equipamentos de frio	37
3.1.2. Iluminação	38
3.1.3. Equipamentos audiovisuais e informáticos.....	38
3.1.4. Máquinas de lavar e secar roupa.....	39
3.1.5. Máquinas de lavar louça.....	39
3.1.6. Forno eléctrico.....	40
3.2. Nova Abordagem para a Modelização da Carga	40
3.2.1. Descrição do novo modelo	42
3.2.2. Conversão de parâmetros entre modelos	43
3.2.3. Agregação de cargas	44
3.3. Estimativa da Poupança	46
Capítulo 4	49
Procedimento e Estudo Experimental	49
4.1. Variação do Consumo (Potência) função da Tensão.....	49
4.1.1. Testes com cargas de laboratório	50
4.1.2. Testes com equipamentos domésticos.....	56
4.2. Comparação com Estudos Anteriores	61
4.2.1. Conversão de parâmetros	61
4.3. Cargas Agregadas (cenários de consumo)	62
4.4. Perfis de Tensão da Rede	64
4.5. Poupança.....	68
Capítulo 5	75
Conclusões	75
5.1. Principais Conclusões	75
5.2. Objectivos Alcançados.....	76
5.3. Trabalhos Futuros	76
Referências	77
Anexo A	81

Lista de figuras

Figura 2.1 - Testes efectuados com motores ($P_N \approx 3650$ W, $U_N = 220$ V e $f_N = 60$ Hz) [14].	8
Figura 2.2 - Lâmpadas de sódio de alta pressão de iluminação pública (400W) [15].	9
Figura 2.3 - Lâmpada fluorescente [15].	9
Figura 2.4 - Quando a tensão baixa as cargas resistivas com termóstatos ficam ligadas mais tempo [11].	11
Figura 2.5 - Consumo de energia para televisores em função da tensão [15].	11
Figura 2.6 - Composição da carga num sistema de distribuição [22].	13
Figura 2.7 - Modelos estáticos de carga (Z, I, P constantes).	14
Figura 2.8 - Diagrama de um estabilizador electromecânico [25].	20
Figura 2.9 - Diagrama de controlo do transformador <i>Buck-boost</i> [25].	20
Figura 2.10 - Princípio de funcionamento do regulador [26].	21
Figura 2.11 - Modo de funcionamento do estabilizador por indução magnética [13].	21
Figura 2.12 - Esquema de um estabilizador electrónico [27].	22
Figura 2.13 - Curva de magnetização [13].	23
Figura 2.14 - Esquema de um estabilizador Ferro-ressonante [28].	23
Figura 2.15- Curva de eficiência do regulador [13].	24
Figura 2.16 - Variação da tensão ao longo do dia (gráfico da esquerda) e potência consumida na mesma área (gráfico da direita) Turim - Itália [26].	25
Figura 2.17 - Custos durante a vida útil de uma instalação de Iluminação Pública [35].	26
Figura 2.18 - Diagrama de funcionamento e economia de energia [26].	27
Figura 2.19 - Regulação da Tensão para um sistema de iluminação público [40].	28
Figura 2.20 - “Tensão Certa” a aplicar ao consumo [41].	29
Figura 2.21 - Aplicação do regulador de tensão no sector doméstico [42].	29

Figura 2.22 - Níveis de tensão típicos em locais de comércio [45] no Reino Unido.	30
Figura 2.23 - Alimentação utilizando um transformador abaixador com redução de 7% da tensão [45].	31
Figura 2.24 - Alimentação com a tensão regulada para 220V [45].	32
Figura 2.25 - Exemplo da variação da tensão [46].	32
Figura 2.26 - Consumo de energia antes e depois da instalação do regulador [44].	33
Figura 3.1 - Repartição dos consumos pelos diferentes tipos de carga no sector residencial (retirado de [33] - PNAEE).	36
Figura 3.2 - Evolução da taxa de posse dos diferentes equipamentos (retirado de [33] - PNAEE).	36
Figura 3.3 - Diagrama de carga para os diferentes equipamentos [48].	37
Figura 3.4 - Perfil de funcionamento de um combinado [48].	38
Figura 3.5 - Diagramas de carga médios de equipamentos audiovisuais e informáticos respectivamente [48].	39
Figura 3.6 - Diagramas de carga médios da máquina de lavar roupa e secar roupa respectivamente [48].	39
Figura 3.7 - Diagrama de carga médio da máquina de lavar louça [48].	40
Figura 3.8 - Esquema de montagem para medição das características da carga.	41
Figura 3.9 - Circuito equivalente de um sistema eléctrico comum.	41
Figura 3.10 - Impedâncias em paralelo.	45
Figura 3.11 - Impedâncias em paralelo.	45
Figura 4.1 - Esquema de montagem, carga resistiva.	50
Figura 4.2 - Potência Activa (P) e Reactiva (Q) função da tensão para a carga resistiva.	50
Figura 4.3 - Variação da resistência e reactância na carga resistiva.	51
Figura 4.4 - Esquema de montagem, carga indutiva.	51
Figura 4.5 - Potência Activa (P) e Reactiva (Q) função da tensão para a carga indutiva.	52
Figura 4.6 - Variação da resistência e reactância na carga indutiva.	52
Figura 4.7 - Esquema de montagem, carga capacitiva.	53
Figura 4.8 - Potência Activa (P) e Reactiva (Q) função da tensão para a carga capacitiva. ...	53
Figura 4.9 - Variação da resistência e reactância na carga capacitiva.	54
Figura 4.10 - Esquema de montagem, carga resistiva e capacitiva.	54
Figura 4.11 - Potência Activa (P) e Reactiva (Q) função da tensão para a carga resistiva e capacitiva.	54

Figura 4.12 - Variação da resistência e reactância na carga resistiva e capacitiva.....	55
Figura 4.13 - Esquema de montagem, carga resistiva, indutiva e capacitiva.	55
Figura 4.14 - Potência Activa (P) e Reactiva (Q) função da tensão para a carga resistiva, indutiva e capacitiva.	55
Figura 4.15 - Variação da resistência e reactância na carga resistiva, indutiva e capacitiva.....	56
Figura 4.16 - Esquema de montagem, equipamento doméstico.	56
Figura 4.17 - Potência Activa (P) e Reactiva (Q) função da tensão em equipamentos de ventilação.	57
Figura 4.18 - Variação da resistência e reactância do equipamento de ventilação.	57
Figura 4.19 - Potência Activa (P) e Reactiva (Q) função da tensão nos computadores.	58
Figura 4.20 - Variação da resistência e reactância nos computadores.	58
Figura 4.21 - Potência Activa (P) e Reactiva (Q) função da tensão no frigorífico.	59
Figura 4.22 - Variação da resistência e reactância no frigorífico.	59
Figura 4.23 - Potência Activa (P) e Reactiva (Q) função da tensão no microondas.	60
Figura 4.24 - Variação da resistência e reactância no microondas.	60
Figura 4.25 - Comparação entre os valores de referência e os valores medidos, em equipamentos informáticos e frigoríficos.	61
Figura 4.26 - Comparação entre os valores de referência e os valores medidos, em cargas resistivas e sistemas de ventilação.	61
Figura 4.27 - Possível repartição do consumo no sector residencial.....	63
Figura 4.28 - Redução de potência para o cenário de consumo anterior.	63
Figura 4.29 - Valores médios da tensão da rede nas três fases, zona de Estarreja	64
Figura 4.30 - Valores médios da tensão da rede nas três fases, zona do Porto.....	65
Figura 4.31 - Valores médios da tensão da rede nas três fases, zona de Ponte da Barca.	65
Figura 4.32 - Variação da tensão ao longo do dia para dias úteis e fins-de-semana numa das fases da zona de Estarreja.....	66
Figura 4.33 - Variação da tensão ao longo do dia para dias úteis e fins-de-semana numa das fases para a zona do Porto.	66
Figura 4.34 - Variação da tensão ao longo do dia para dias úteis e fins-de-semana numa das fases na zona de Ponte da Barca.	66
Figura 4.35 - Diferença verificada nos valores de tensão numa das fases, valores mínimos e máximos na zona de Estarreja.....	67
Figura 4.36 - Diferença verificada nos valores de tensão numa das fases, valores mínimos e máximos na zona do Porto.	68

Figura 4.37 - Diferença verificada nos valores de tensão numa das fases, valores mínimos e máximos na zona de Ponte da Barca.....	68
Figura 4.38 - Distribuição do consumo médio diário considerado para o cálculo da poupança.	69
Figura 4.39 - Diagrama de cargas médio considerado no estudo para uma habitação.	69
Figura 4.40 - Variação da tensão na rede e valores de regulação utilizados no estudo, Concelho de Ponte da Barca.	70
Figura 4.41 - Redução de consumo obtida para os níveis de tensão indicados (dias úteis na zona de Ponte da Barca).....	70
Figura 4.42 - Redução de consumo obtida para os níveis de tensão indicados (fim-de-semana na zona de Ponte da Barca).....	71
Figura 4.43 - Representação do consumo com diferentes tensões de entrada.	72
Figura 4.44 - Esquema representativo das variáveis em causa.	72

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Exemplo de resultados de testes efectuados na Califórnia [11].	6
Tabela 2.2 - Ensaio feitos com equipamentos reguladores de tensão [17].	10
Tabela 2.3 - Parâmetros do modelo polinomial [6, 7].	16
Tabela 2.4 - Expoentes para os diferentes tipos de carga [4, 5].	17
Tabela 3.1 - Tarifas de baixa tensão normal até 20.7 kVA [48].	48
Tabela 4.1 - Conversão dos parâmetros dos modelos	62
Tabela 4.2 - Valores médios percentuais de redução de potência obtidos	71

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

AC	Corrente Alternada (<i>Alternating Current</i>)
ADENE	Agência para a Energia
AQS	Águas Quentes Sanitárias
BT	Baixa Tensão
BTN	Baixa Tensão Normal
CE	Comunidade Europeia
CEI	Comissão Electrotécnica Internacional
CVR	<i>Conservation Voltage Reduction</i>
DC	Corrente Contínua (<i>Direct Current</i>)
DEEC	Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
DGEG	Direcção Geral de Energia e Geologia
EDP	Energias de Portugal
EUA	Estados Unidos da América
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
PNAEE	Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética
RMS	Valor eficaz (<i>Root Mean Square</i>)

Lista de símbolos

%	Por Cento
€	Euro
±	Mais ou menos
A	Ampere (corrente eléctrica)
cv	Cavalo-vapor (potência)
F	Fase (condutor)
f	Frequência
h	Hora (tempo)
Hz	Hertz (frequência)
k	quilo (prefixo)
M	Mega (prefixo)
N	Neutro (condutor)
Nm	Newton metro (binário)
°C	Graus Celsius (temperatura)
p.u.	Por unidade (valor relativo)
rpm	Rotações por minuto (velocidade angular)
V	Volt (tensão eléctrica ¹)
VA	Volt-ampere (potência eléctrica aparente)
var	Volt-ampere reactivo (potência eléctrica reactiva)
W	Watt (potência activa)
Wh	Watt-hora (energia)
λ ; $\cos\varphi$	Factor de potência (PF em literatura técnica americana)

1 Nesta dissertação é utilizado o símbolo “V” para representar tensão eléctrica, dada a sua utilização nos modelos de carga estudados, apesar das mais recentes publicações normativas de CEI, legalmente aplicáveis no nosso país, indicarem a utilização do símbolo “U”, reservando “V” para potencial eléctrico.

Capítulo 1

Introdução

A energia é vista actualmente como um recurso muito precioso estando toda a sociedade dependente dela. Dada esta importância, tem existido um forte investimento na descoberta e optimização de novas formas de conversão e gestão dos recursos existentes. Se por um lado é necessário encontrar outras formas de produzir energia para atender à crescente procura da mesma, por outro lado, deve-se promover a redução do consumo através do aumento da eficiência, sem afectar a qualidade de serviço prestada.

1.1. Contextualização

A eficiência energética pode ser vista como tendo um amplo significado, engloba todas as alterações das quais resulta a diminuição da energia utilizada para produzir uma determinada actividade. A escassez dos combustíveis fósseis e os problemas ambientais que lhe estão associados levam a encarar a eficiência energética como uma das soluções para responder à procura de energia, combatendo também as alterações climáticas. *“Aprender a utilizar de forma responsável a energia de que dispomos é garantir um futuro melhor para as gerações vindouras”* [1].

Em Portugal a energia produzida representa apenas 15% da energia primária consumida [2], todo o resto é importado do exterior. Esta situação provoca uma forte dependência do país tendo consequências directas na economia (produção de bens e serviços mais caros).

No sector residencial tem-se verificado ao longo dos anos um forte crescimento no consumo de energia, este crescimento está relacionado com o aumento do parque habitacional e com o crescimento do número de equipamentos especialmente focados no conforto. Não sendo este o sector que mais energia consome em Portugal, representa um sector com forte potencial de redução do consumo. O sector residencial foi responsável por aproximadamente 17% do consumo total de energia primária e cerca de 29% dos consumos de electricidade em 2005 [3], o que evidencia a necessidade de uma atenção particular à

2 Introdução

eficiência energética dos equipamentos consumidores de electricidade neste sector. Em termos de utilização final, o consumo de energia nos edifícios residenciais pode ser distribuído em: (i) 50% cozinhas e águas quentes sanitárias; (ii) 25% aquecimento e arrefecimento ambiente e (iii) 25% para iluminação e outros equipamentos electrodomésticos.

É importante referir que em certos edifícios residenciais algumas intervenções eficazes podem conduzir a poupanças de 30 a 35% no consumo de energia, mantendo as mesmas condições de conforto. *“A poupança de energia é a primeira fonte de energia renovável actualmente disponível”* [3].

A melhoria da eficiência pode ser encarada de diferentes formas, por essa razão, têm sido feitas campanhas para alterar comportamentos e dados incentivos à troca dos equipamentos menos eficientes por outros mais eficientes. A gestão do consumo é também uma forma de promover a eficiência, por isso, têm-se procurado novas soluções de redução desse consumo sem afectar a qualidade de serviço. Esta dissertação pretende explorar a redução de consumo com o controlo da tensão aplicada ao sistema em análise (equipamento ou conjunto de equipamentos). O aumento de eficiência no consumo de energia conduz à redução da factura energética do consumidor.

1.2. Motivação

O motivo principal para a realização da dissertação com o tema proposto está relacionado com a capacidade de “controlo” do consumo energético por alteração das condições de operação do sistema.

Para ser possível operar o sistema eléctrico da melhor forma com os recursos disponíveis e com o menor custo é necessário ter um conhecimento profundo de todos os elementos que o constituem e do seu comportamento perante variações das condições de operação. As cargas podem ser consideradas como um dos elementos mais importantes do sistema eléctrico, por esse motivo a tarefa de modelizar o seu comportamento tem recebido a atenção de especialistas em todo o mundo. O interesse em representar a forma como o consumo varia com a tensão decorre da redução que se pode alcançar na energia consumida e a poupança daí resultante, mantendo uma boa qualidade de serviço.

O estudo de cada equipamento em particular permite perceber como varia a potência absorvida quando a tensão de alimentação que lhe é aplicada varia, desta forma diferentes tipos de equipamentos (diferentes tipos de carga) vão permitir ou não a redução do consumo através da regulação da tensão.

A motivação central não está no estudo do equipamento regulador de tensão, mas sim, no potencial de poupança associado à redução de consumo. Pretende-se aferir da viabilidade, técnica e económica, da utilização de reguladores de tensão em Portugal.

1.3. Objectivos

Como principais objectivos desta dissertação podem ser indicados os seguintes pontos:

- Efectuar uma análise dos aspectos teóricos de modelização da carga presente na instalação estudada, no que se refere à variação da potência consumida com a tensão aplicada. Efectuar medidas, com cargas ideais de laboratório e equipamentos reais, de forma a demonstrar a possibilidade de redução de consumo com a redução de tensão em diferentes tipos de equipamentos. Com a agregação de cargas destes equipamentos estudados, estimar a redução de consumo em instalações eléctricas reais.
- Recolher informação sobre tipos de equipamentos de controlo de tensão existentes no mercado.
- Identificar perfis de tensão diários aplicados a instalações de consumo para diferentes pontos geográficos e períodos de consumo.
- Perceber as diversas soluções tecnológicas de equipamentos de regulação de tensão, avaliando a sua potencial eficácia na redução de consumo para diferentes tipos de consumidores e padrões de variação da tensão na rede.
- Demonstrar a economia em termos de consumo energético conseguida com a utilização destes equipamentos de regulação.
- Indicar soluções de engenharia para um possível sistema de redução de consumo por regulação da tensão.

1.4. Estrutura da Dissertação

Além do capítulo inicial esta dissertação é composta por mais quatro capítulos e anexos, neste primeiro capítulo é feita a introdução e contextualização do problema, é apresentada a motivação para o trabalho e ainda são indicados os objectivos subjacentes ao tema em análise.

No capítulo 2 é efectuada a revisão do estado da arte, em relação a estudos realizados anteriormente, em que foram abordados temas relacionados. São também apresentados aspectos relacionados com a modelização de carga e modelos normalmente utilizados nesses estudos. Ainda neste capítulo são apresentadas algumas das características de equipamentos reguladores de tensão e a forma como são utilizados no sistema eléctrico.

O capítulo 3 apresenta a metodologia desenvolvida para a modelização da carga bem como a formulação matemática adoptada. É indicada a forma como é realizada a conversão de parâmetros de diferentes modelos de carga para o modelo criado. Neste capítulo é também efectuada a caracterização do consumo no sector residencial, assim como é

apresentada a forma de agregação de cargas utilizada e a forma como é calculada a poupança alcançável com a regulação da tensão.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos mediante a aplicação da metodologia proposta. São apresentados os dados reais de medição de potência função da tensão nos diferentes equipamentos estudados, sendo feita a comparação com os resultados apresentados por outros estudos. Neste capítulo é também feita a caracterização da rede eléctrica quanto ao nível de tensão em diferentes dias e horas. Usando a metodologia descrita no capítulo anterior são agora apresentados os resultados quanto à redução da potência absorvida em função da tensão aplicada para diferentes cenários de consumo.

No capítulo 5 é feita uma conclusão aos assuntos principais do trabalho realizado e objectivos alcançados, são também apresentadas sugestões para desenvolvimentos futuros sobre o tema abordado.

Por último em anexo são apresentados alguns gráficos de caracterização dos tipos de cargas utilizadas no cálculo de redução de consumo. São também indicadas as características dos equipamentos de medição utilizados nos ensaios.

1.5. Equipamentos e Informação

A componente prática da dissertação, em que foram feitas medições da potência consumida como função da tensão para diferentes tipos de carga, teve o apoio da FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, nomeadamente com a disponibilização do laboratório de Máquinas Eléctricas do seu DEEC - Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores e dos equipamentos necessários à realização das experiências efectuadas. O comportamento dos equipamentos domésticos perante variações de tensão de alimentação foi medido em instalações da empresa SMARTWATT que disponibilizou também os electrodomésticos utilizados. As medidas efectuadas foram realizadas com o auxílio e supervisão do Eng.º Rui Azevedo, supervisor da empresa nesta dissertação. Os valores de tensão na rede de BT, muito importantes para o cálculo da poupança alcançável, foram também disponibilizados pela empresa.

Para a realização do estudo do comportamento da carga foram utilizados alguns dos resultados de experiências realizadas anteriormente e apresentadas em documentos relacionados com esse tema [4-7]. Com a impossibilidade de efectuar experiências com todos os tipos de cargas presentes no sector residencial foi assim possível recorrer a estes artigos de forma a poder completar o estudo do consumo característico neste sector.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1. Variação do Consumo com a Tensão

Pesquisas efectuadas nas décadas de 1970 e de 1980 ao nível dos sistemas de distribuição sugerem que se pode obter uma forte redução do consumo operando os *feeders* da rede a níveis de tensão mais baixos, ainda que dentro da gama de limites aceitáveis. Este conceito foi chamado de “*Voltage Reduction*” estando a sua aplicação dependente da capacidade de regulação existente na rede. Estes estudos tinham como objectivo conhecer os efeitos da composição e das características da carga no desempenho do sistema [8]. Nos EUA, a baixa tensão estipulada é de 120V, com uma variação de $\pm 5\%$, o que resulta numa variação entre 114 e 126V; no entanto, os gestores do sistema tendem a manter a tensão sempre acima dos 120V de forma a terem uma maior margem de segurança durante os períodos de ponta da carga. Ao usar níveis de tensão mais elevados aumenta-se o consumo e assim também aumentam as receitas para os comercializadores de energia [9]. Em geral, salvo algumas excepções (alguns tipos de carga), a redução da tensão reduz a potência da carga e assim a energia consumida. Este é o fundamento e motivação para o trabalho realizado no âmbito desta dissertação. No entanto, nem sempre existe uma correspondência entre a redução de potência e a redução de consumo energético, isto porque alguns equipamentos apresentam o consumo em função da utilização final. Em reacção à redução da potência, alguns equipamentos respondem com um período de utilização mais longo, podendo implicar a não redução do consumo energético para o ciclo completo de utilização.

A redução do consumo com a redução da tensão pode ser expressa por um factor “*CVR Factor*” (*Conservation Voltage Reduction*) [10], que é definido como sendo a percentagem de redução do consumo por cada 1% de redução de tensão, este factor é utilizado em grande parte das ferramentas de cálculo de eficiência energética. O valor deste factor está fortemente relacionado com os equipamentos em estudo e com as características da carga.

Um aspecto que determina a eficácia da redução da tensão é a quantidade de carga resistiva *versus* reactiva de um dado circuito [9].

Tipos de cargas como resistências eléctricas, aquecedores de água e lâmpadas incandescentes funcionam como cargas resistivas e consomem predominantemente potência activa. Assim as cargas resistivas respondem directamente à variação da tensão aplicada. No caso de existirem controlos automáticos (termóstatos) o impacto é reduzido pois o equipamento vai estar no estado “ON” mais tempo de forma a manter a temperatura, apesar deste fenómeno a potência ainda varia directamente com a tensão [11].

Cargas reactivas normalmente apresentam uma indutância significativa absorvendo energia activa e reactiva, aqui são incluídas cargas como motores, bombas eléctricas e compressores. Ao reduzir a tensão nestas cargas abaixo das suas especificações nem sempre leva à redução da potência, este efeito é mais pronunciado em consumidores industriais com grandes motores de indução particularmente para aqueles que têm ajuste de velocidade [9].

Na Califórnia nas décadas de 1970 e 1980 foram realizados testes em subestações de forma a estudar o efeito da redução da tensão de distribuição no consumo de energia. Nestes testes [12] é feita a separação dos tipos de carga em classe Residencial, Comercial e Industrial dadas as suas características distintas (horários de funcionamento, tipos de equipamentos utilizados, etc.).

Em cada circuito da rede é considerada a percentagem de cada uma destas classes no total da carga. A tabela seguinte apresenta os valores obtidos para os testes efectuados num dos pontos estudados.

Tabela 2.1 - Exemplo de resultados de testes efectuados na Califórnia [12].

Load mix on test circuit (R-C-I%) ^a	Number of months in test	% energy savings per 1% voltage reduction
80-20-0	4.1	1.44
98-2-0	18.0	1.24
80-20-0	17.2	1.61
90-10-0	16.4	1.61
75-25-0	15.3	0.65
0-100-0	16.4	1.69
10-10-80	14.8	0.58
60-40-0	1.1	1.57
32-14-54	2.4	1.03
49-27-24	2.4	0.52
14-21-65	0.5	0.36
54-4-42	0.5	0.46
0-8-92	18.9	0.46
77-16-7	4.7	0.80
91-5-4	5.0	1.54
55-45-0	1.8	0.84
Mean (weighted by months)		1.12
Standard Error of Mean		0.126
T-ratio		8.89 ^b

^a Residential, Commercial, Industrial. Industrial includes Agricultural.

^b Significant at 95% confidence level.

A partir dos resultados obtidos nos vários testes foi possível tirar conclusões acerca do potencial de redução do consumo e da composição da carga nos diferentes sectores. Os sectores comercial e residencial apresentaram valores de redução do consumo superiores ao sector industrial. Os resultados indicam que em média no sector residencial a redução no consumo seria de 0,76% por cada 1% de redução de tensão, no sector comercial e industrial essa redução seria de 0,99% e 0,41% respectivamente. Estes valores de redução do consumo estão muito correlacionados com o local onde foram medidos e com a carga presente nesse mesmo local, não podendo por isso ser generalizados a outras situações.

Os equipamentos que compõem a carga existente na rede, pelas suas características, vão definir a forma de variação do consumo em função da variação dos valores de tensão.

2.1.1. Motores

No caso de motores geralmente é prejudicial a diminuição da tensão uma vez que provoca o aumento da corrente absorvida, mas isso só acontece no caso em que a potência da carga é constante, aumentando as perdas na forma de calor. Todos os equipamentos têm um ponto óptimo de funcionamento dentro da gama indicada pelo fabricante. Uma regra considerada para os motores é que por cada 10°C acima da temperatura normal de funcionamento em regime permanente a vida útil do motor é reduzida em 50% [13].

A constante de inércia tal como a constante de tempo são determinantes na resposta em potência activa e reactiva por parte do motor aquando de variações de tensão e frequência.

Estes equipamentos funcionam dentro de uma gama de valores de tensão, sendo nessa gama o seu funcionamento seguro e mais eficiente. Dentro destas especificações pode haver variações consideráveis devendo por isso ser estudadas a fim de verificar a conservação da energia usando a redução da tensão [14].

Com a redução da tensão, geralmente a potência também diminui (excepto para o funcionamento com binário constante quando a tensão aplicada está abaixo do valor estipulado, como se pode ver na figura 2.1), o factor de potência e a eficiência em geral também melhoram.

8 Estado da Arte

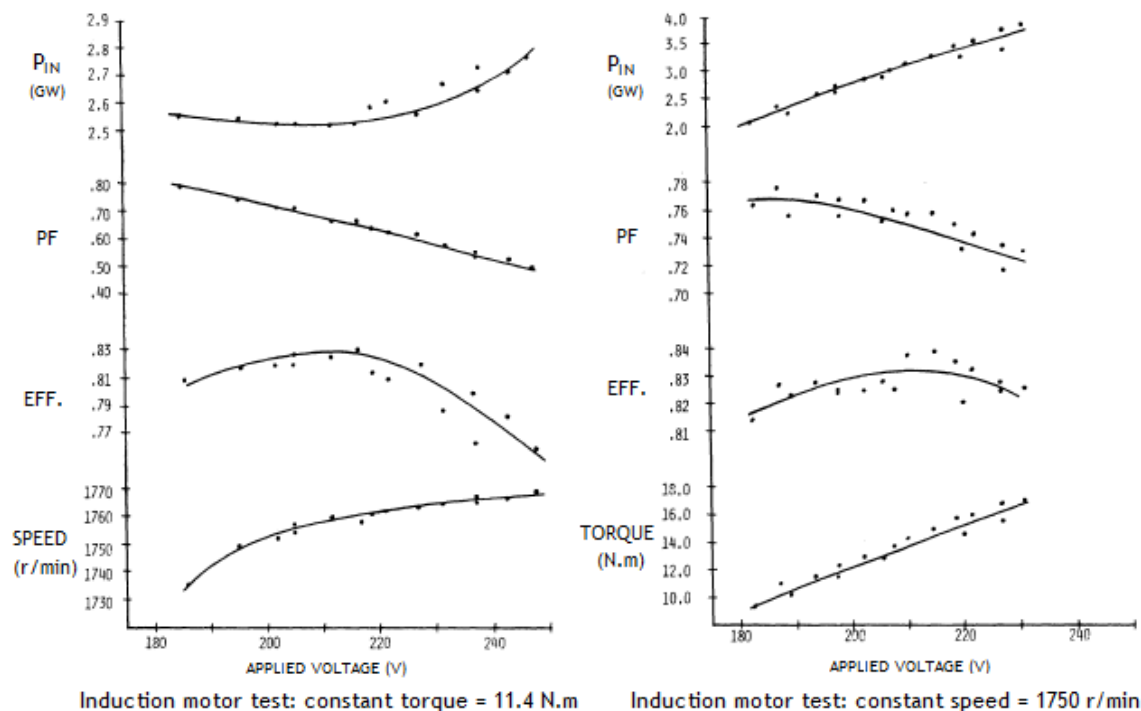


Figura 2.1 - Testes efectuados com motores ($P_N \approx 3650$ W, $U_N = 220$ V e $f_N = 60$ Hz) [14].

Estes testes foram efectuados pelo Laboratório de Maquinas Eléctricas na Universidade de Ohio para motores de indução trifásico de rotor bobinado de 5cv, 220V, 1720 rpm e 14,8A. Os gráficos da figura anterior apresentam medidas para o caso de binário constante e para velocidade constante. Cargas de binário constante representam compressores de sistemas de ar condicionado, frigoríficos, arcas congeladoras, etc. [15], neste caso a velocidade de rotação desce monotonamente com a redução do valor da tensão. Nos motores com velocidade constante o pico de eficiência está próximo dos 215V e o binário diminui de forma praticamente linear com a redução da tensão.

2.1.2. Lâmpadas de descarga

Lâmpadas de descarga incluem lâmpadas de vapor de mercúrio, vapor de sódio, fluorescentes e tipos similares. Estes tipos de lâmpadas são muito usadas em parques industriais e iluminação de rua pelo seu elevado rendimento energético. Estas lâmpadas apagam-se para tensões abaixo de 80% da tensão nominal [11, 16], quando a diferença de potencial aplicada não é suficiente para provocar a descarga eléctrica.

Na figura 2.2 pode-se observar a iluminação relativa, a potência de entrada e o índice de desempenho em função da tensão aplicada em lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão de 400W utilizadas na iluminação pública.

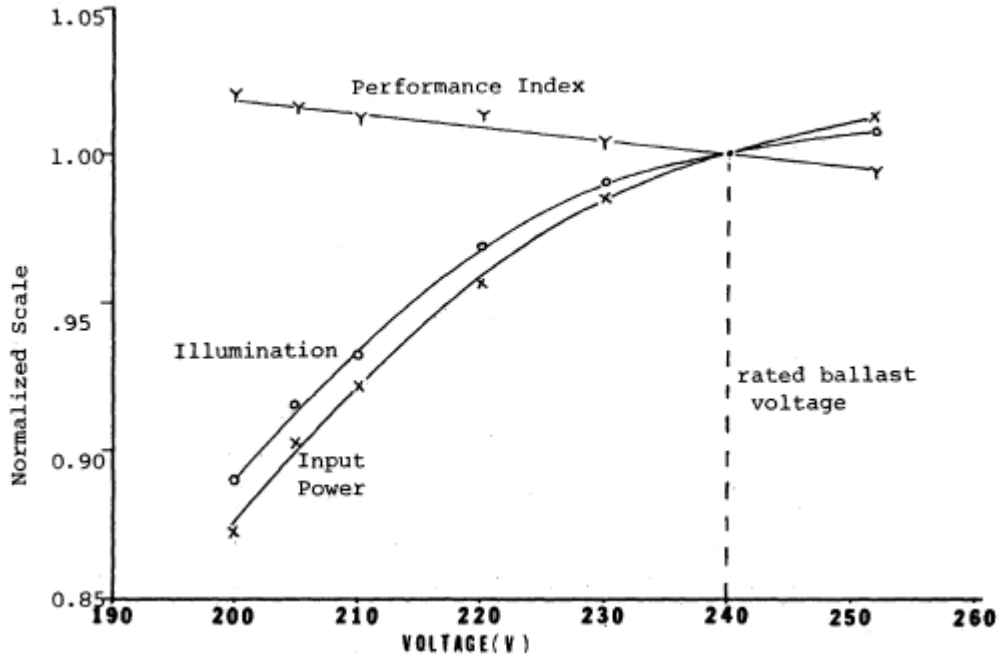


Figura 2.2 - Lâmpadas de sódio de alta pressão de iluminação pública (400W) [15].

O desempenho é definido como a iluminação dividida pela potência de entrada. A escala está normalizada em relação a 240 V, verificando-se que a curva de redução de potência é mais acentuada do que a curva de redução da luminosidade.

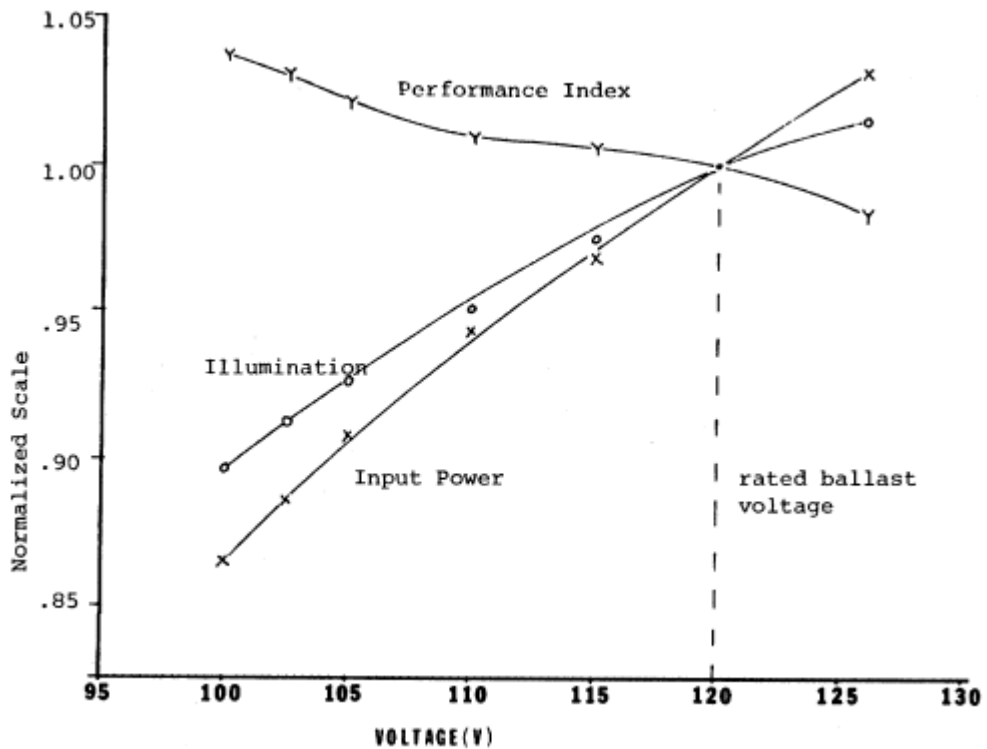


Figura 2.3 - Lâmpada fluorescente [15].

Para uma lâmpada fluorescente (figura 2.3) com a tensão nominal de 120V, este índice de desempenho sobe com a redução da tensão, sendo, no entanto, necessário ter em consideração que a iluminação também diminui e que abaixo de determinado valor de tensão a lâmpada apaga-se.

2.1.3. Lâmpadas incandescentes

As lâmpadas incandescentes geralmente são modelizadas por uma resistência constante. No entanto como a temperatura no filamento varia com a tensão também a resistência varia, como resultado é possível verificar uma pequena variação da potência activa consumida durante o seu funcionamento. Estas lâmpadas estão em fase de retirada de mercado pelo que é considerada mais interessante a sua substituição que a instalação dos equipamentos de regulação de tensão. No entanto a poupança conseguida é potencialmente muito interessante, precisamente porque são lâmpadas muito ineficientes e a redução de potência/consumo é directamente proporcional ao quadrado da redução da tensão (resistência pura). A redução do nível de iluminação é aproximadamente proporcional à redução de tensão [17].

Tabela 2.2 - Ensaio feitos com equipamentos reguladores de tensão [18].

Redução de tensão	17%	21%	29%
Redução de potência (kW)	32%	37%	51%
Redução do nível de iluminação (lux)	19%	22%	31%

A tabela anterior mostra dados recolhidos de ensaios realizados com a utilização de equipamentos de redução da tensão.

2.1.4. Cargas controladas por termóstatos

Existem muitas cargas controladas por termóstatos, como aquecedores, máquinas de solda, aquecedores de água, etc. Tais cargas operam numa pequena faixa de temperatura não se verificando assim o efeito de alteração da resistência.

Depois de alguns segundos da redução de tensão, a redução de calor do equipamento vai ser sentida pelo termóstato assim o equipamento vai estar ligado mais tempo (figura 2.4) [11]. Neste tipo de cargas é justificada a redução da tensão quando esta se encontra acima do seu valor nominal, já que esse funcionamento com tensão elevada provoca a diminuição do seu tempo de vida útil.

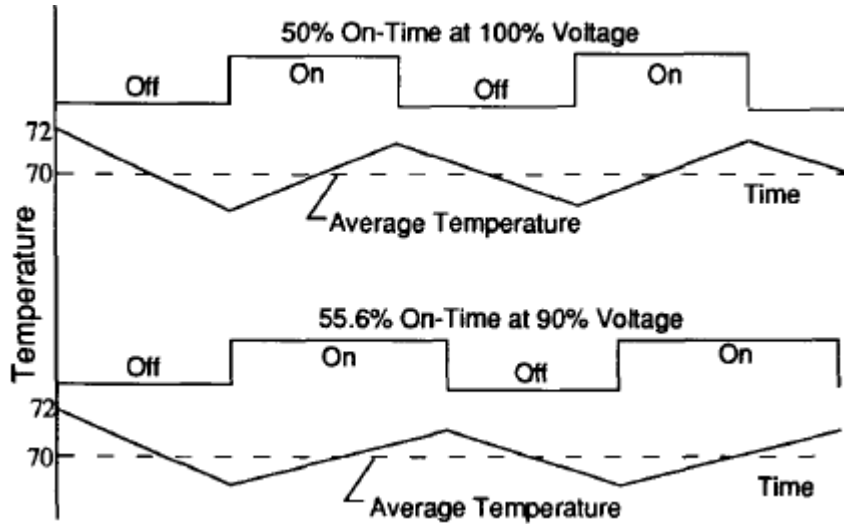


Figura 2.4 - Quando a tensão baixa as cargas resistivas com termóstatos ficam ligadas mais tempo [11].

2.1.5. Dispositivos electrónicos

Neste tipo de cargas estão inseridos os computadores, microondas, televisores e outros equipamentos dotados com fontes de alimentação reguladas. Estas fontes de alimentação fornecem uma tensão DC constante quando na entrada têm um nível de tensão não abaixo de 90% do valor nominal [11]. Abaixo desta tensão algumas destas cargas deixam de funcionar.

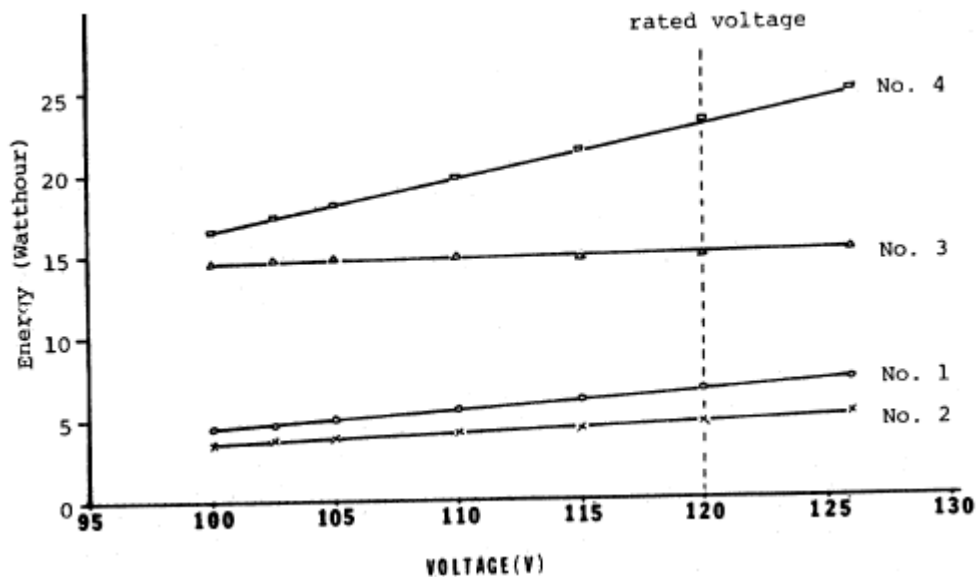


Figura 2.5 - Consumo de energia para televisores em função da tensão [15].

O teste foi realizado com quatro tipos de televisores diferentes e com medições de dez em dez minutos. Como se pode ver pelo gráfico da figura a energia consumida varia de equipamento para equipamento, em alguns dos casos praticamente não existe variação da energia com a tensão (caso 3), em outros a variação é significativa (caso 4).

2.2. Modelização de Cargas Eléctricas

O comportamento real da carga tem uma estreita relação com a tensão que lhe é aplicada, assim a tensão na rede está relacionada com a composição da carga que nela está presente. Diferentes tipos de carga têm diferente impacto no sistema [5]. Estudos relacionados com a modelização da carga tiveram grande importância para a compreensão do comportamento do sistema energético.

2.2.1. Carga eléctrica

O conceito de carga em redes eléctricas pode ser entendido de diferentes formas. Como um dispositivo ligado à rede eléctrica que consome energia ou a forma de representar a potência total (activa e ou reactiva) consumida pela totalidade dos equipamentos ligados ao sistema. Em ambas as formas a carga é caracterizada pelo consumo que apresenta.

A representação da composição da carga continua a ser uma área de grande incerteza, a forma exacta de modelizar essas cargas é difícil de encontrar devido a vários factores como [11] :

1. Grande e variado número de componentes da carga;
2. Localização das cargas em instalações do cliente;
3. Alteração dos componentes de carga com as condições de tempo, dia da semana, hora do dia, estação do ano e a sua própria modificação ao longo do tempo;
4. Falta de informação precisa na composição de cada uma das cargas.

De forma a obter uma boa representação da carga é necessário contabilizar os efeitos de todos os seus elementos constituintes, um modelo de representação deve conter todos os elementos possíveis de forma a aumentar a sua precisão.

Uma carga pode ser constituída pela combinação de diferentes componentes, em parte resistiva, indutiva e/ou capacitiva. A componente resistiva está relacionada com o consumo de energia activa e as componentes indutiva e capacitiva estão relacionadas com a utilização de energia reactiva. A relação entre estas componentes das cargas presentes na rede define o factor de potência do consumo dessa rede. O factor de potência da carga pode ser calculado como o cosseno do ângulo entre a potência aparente e a potência activa. Para o bom funcionamento da rede eléctrica estas duas componentes da carga devem ser compensadas mutuamente [19]. Como apenas a energia activa produz trabalho as cargas idealmente devem funcionar com factor de potência próximo de 1.

2.2.2. Modelização de carga com base em modelos matemáticos

Um modelo de carga é uma forma de representar matematicamente a relação existente entre a tensão e a potência ou corrente que circula para a carga. Estes modelos são baseados no conhecimento dos componentes da carga.

Existem três formas diferentes de modelizar o comportamento da carga: cargas estáticas, cargas dinâmicas e cargas termostáticas, sendo que em vários estudos apenas são considerados os dois primeiros grupos, como é o caso apresentado na figura 2.6. As cargas que podem ser representadas por uma função algébrica da tensão são aqui consideradas como cargas estáticas. No caso das cargas dinâmicas é necessário modelizar explicitamente os componentes rotacionais como motores de indução ou síncronos [20]. As cargas termostáticas são aquelas que actuam de forma a manter uma temperatura especificada. Neste caso ao baixar a tensão a potência também baixa mas como aumenta o tempo de funcionamento o consumo tende a ser mantido.

Este tipo de classificação de carga é normalmente usado em programas computacionais de estabilidade e controlo [21].

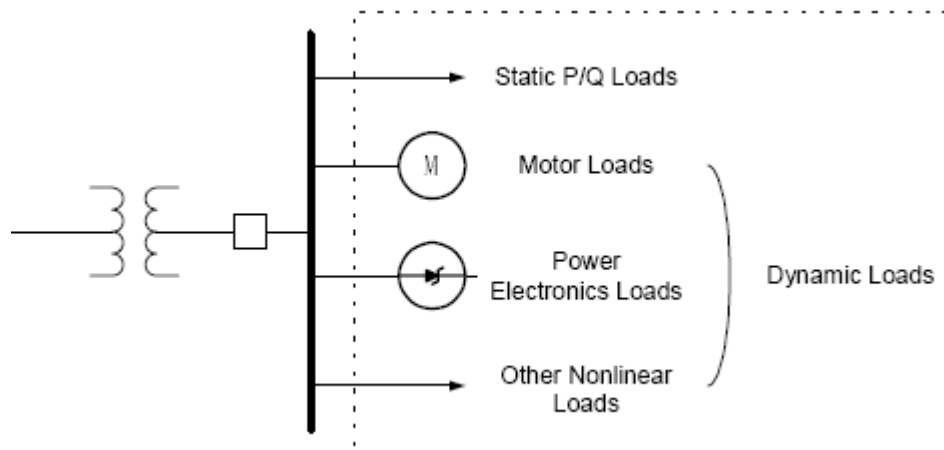


Figura 2.6 - Composição da carga num sistema de distribuição [22].

Ao efectuar um estudo de carga num dado barramento do sistema é necessário ter em conta que essa carga é obtida pela combinação dos diversos elementos individuais que a constituem. Em estudos de cargas agregadas estas são normalmente classificadas por classes: industrial, comercial e residencial [7, 12]. Estas classes são criadas pela composição da carga (componentes individuais) onde se consideram cargas como iluminação, refrigeração, força motriz entre outros. As características da carga são representadas por um conjunto de parâmetros que as definem, como o factor de potência, a variação da potência com a tensão, etc. Estas características permitem caracterizar o comportamento da carga perante alterações no modo como são operadas.

O modelo que representa um dado tipo de equipamentos eléctricos deve ser continuamente actualizado para novas versões dada a constante evolução das cargas.

Modelos estáticos

Os modelos estáticos expressam os valores de potência activa e reactiva absorvida pela carga para um dado instante de tempo através de uma função algébrica da tensão e da frequência para o mesmo instante de tempo [11].

Um bom modelo deve possuir determinadas características que o façam corresponder à carga física real, deve ainda ser flexível na relação com os tipos de carga que representa [16]. Uma vez que se trata de modelos estáticos e as variações no nível de tensão consideradas para o estudo são pequenas a frequência pode ser considerada constante.

Os vários tipos de equipamentos ligados à rede eléctrica exibem diferentes sensibilidades as variações de tensão. Nos modelos estáticos de representação de cargas individuais é geralmente feita a divisão em três categorias (figura 2.7) dependendo da sua variação em função da tensão:

- Modelo de carga com potência constante;
- Modelo de carga com corrente constante;
- Modelo de carga com impedância constante.

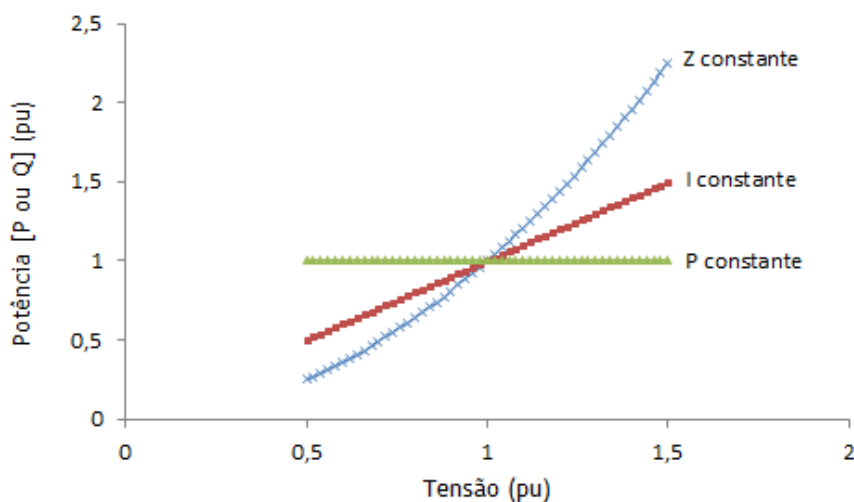


Figura 2.7 - Modelos estáticos de carga (Z, I, P constantes).

Um modelo de carga com potência constante representa uma situação em que a potência não varia com a alteração da tensão. Assim são representadas cargas em que a potência de que necessitam está bem definida e não pode ser alterada, como fontes de alimentação electrónicas.

No caso em que a corrente é constante a potência varia directamente com a tensão. Aqui são representados alguns tipos de fontes de alimentação, muitos sistemas de galvanização entre outros [9].

Para o modelo estático de carga com impedância constante a potência varia directamente com o quadrado da tensão. Nesta parcela do modelo são representadas cargas como lâmpadas incandescentes, aquecedores sem termóstato e outros tipos de cargas resistivas não controladas.

Ao considerar dois tipos de carga diferentes é possível perceber a diferente influência da tensão no sistema. Se a carga for do tipo impedância constante e se houver um abaixamento da tensão no circuito haverá também uma diminuição da corrente nas linhas de transmissão e assim uma redução da queda de tensão nas mesmas. Esta redução actua contrariando o problema que lhe deu origem. Deste modo é estabelecida uma tensão de estabilização. No caso do tipo de carga de potência constante ocorre o contrário, uma queda de tensão no circuito provoca o aumento da corrente nas linhas de transmissão por forma a manter a potência aproximadamente constante. Assim a queda de tensão nas linhas também aumentará, piorando o problema inicial.

Modelo Polinomial

Este modelo considera que a potência de carga em um barramento i é dada por uma relação polinomial com a tensão:

$$P_{Li} = P_o \left[a1 + a2 \left(\frac{V_i}{V_o} \right) + a3 \left(\frac{V_i}{V_o} \right)^2 \right] \quad (2.1)$$

$$Q_{Li} = Q_o \left[a4 + a5 \left(\frac{V_i}{V_o} \right) + a6 \left(\frac{V_i}{V_o} \right)^2 \right] \quad (2.2)$$

Em que:

P_o, Q_o representam os valores estipulados das potências activa e reactiva para a tensão estipulada V_o ;

V_o representa a tensão estipulada (em geral 1 p.u.);

P_{Li}, Q_{Li} são as potências absorvidas pela carga a uma tensão V_i .

No caso de este modelo representar um equipamento eléctrico específico, V_o corresponde a sua tensão estipulada, P_o e Q_o correspondem à potência consumida à tensão estipulada.

Pelas equações (2.1 e 2.2) é possível verificar que os coeficientes $a1, a4$ dizem respeito a potência constante, $a2, a5$ a corrente constante e $a3, a6$ a impedância constante.

$$a1 + a2 + a3 = a4 + a5 + a6 = 1 \quad [4]$$

Este modelo é também conhecido por modelo “ZIP” em que Z indica impedância constante, I corrente constante e P potência constante.

Tabela 2.3 - Parâmetros do modelo polinomial [6, 7].

Tipos de Carga	So (VA)	fp	Potência Activa			Potência Reactiva		
			Z	I	P	Z	I	P
Lâmpadas incandescentes	100	1,00	0,64	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00
Lâmpada fluorescente compacta	18	0,91	-0,30	1,36	-0,05	0,60	-1,08	0,04
Lâmpada fluorescente convencional (balastro magnético)	151	0,49	0,34	1,31	-0,65	3,03	-2,89	0,86
Fluorescente com balastro electrónico	56	0,86	0,35	0,72	-0,04	0,28	-0,90	0,03
Lâmpada de halogénio	100	1,00	0,66	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00
Aquecedor de ambiente	1200	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Secador	4900	1,00	1,02	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00
Forno	3050	1,00	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Carregador de bateria	6430	0,76	3,51	-3,94	1,43	5,80	-7,26	2,47
Ventoinha	145	0,97	0,87	0,14	-0,01	0,11	0,16	-0,01
Máquina de lavar roupa	654	0,61	0,05	0,31	0,63	-0,56	2,20	-0,65
Máquina de lavar louça	500	0,99	0,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Microondas	1361	1,00	-2,78	6,06	-2,28	0,00	0,00	0,00
Frigorífico e congelador	1030	0,84	1,19	-0,26	0,07	0,59	0,65	-0,24
Computador	150	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,15

Os coeficientes do modelo apresentados na tabela 2.3 são obtidos com base em medições experimentais [6, 7], estes coeficientes são calculados de forma a representarem a curva de potência em função da tensão para a carga específica.

Modelo exponencial

Modelo de carga estática que representa a relação da potência com a tensão com uma equação exponencial:

$$P_{Li} = P_o \left(\frac{v_i}{V_o} \right)^\alpha \quad (2.3)$$

$$Q_{Li} = Q_o \left(\frac{v_i}{V_o} \right)^\beta \quad (2.4)$$

α, β são parâmetros exponenciais que descrevem o comportamento da carga perante variações da tensão de operação.

Estes expoentes dependem do tipo de carga que está a ser representada. Para modelos de carga com potência constante $\alpha = \beta = 0$, para corrente constante $\alpha = \beta = 1$ e para impedância constante $\alpha = \beta = 2$.

A tabela 2.4 apresenta valores típicos de α e β para alguns tipos de carga presentes em sistemas eléctricos [4, 5], estes coeficientes resultam de medições experimentais.

Tabela 2.4 - Expoentes para os diferentes tipos de carga [4, 5].

Tipos de Carga	α (potência activa)	β (potência reactiva)
Lâmpadas incandescentes	1,54	0,00
Lâmpadas fluorescentes compactas	0,95 - 1,03	0,31 - 0,46
Lâmpadas fluorescentes convencional	2,07	3,21
Ar condicionado central	0,20	2,20
Ar condicionado para quartos	0,50	2,50
Bomba do sistema de aquecimento	0,20	2,50
Resistência para aquecimento ambiente	2,00	0,00
Aquecedor de água	2,00	0,00
Ventilador de forno	0,08	1,60
Carga de bateria	2,59	4,06
Frigorífico e congelador	0,80	2,50
Máquina de lavar louça	1,80	3,50
Máquina de lavar roupa	0,08	1,60
Máquina de secar roupa	2,00	3,30
Pequenos motores industriais	0,10	0,60
Grandes motores industriais	0,06	0,50
Bomba de água para irrigação	1,40	1,40

A identificação destes parâmetros pode ser efectuada pelo método dos mínimos quadrados [21], como forma de adaptar o modelo aos valores medidos experimentalmente.

Modelos Dinâmicos

São modelos que expressam a potência activa e reactiva para um qualquer instante em função da tensão e frequência de instantes passados e presentes.

A necessidade de modelos precisos durante os transitórios levou à formulação de modelos dinâmicos, estes transitórios podem demorar vários minutos após a perturbação. Por exemplo o colapso de tensão é geralmente considerado como um fenómeno de longa duração que requer modelos de carga precisos no período em que o nível de tensão é baixo, neste caso os modelos de carga estáticos não conseguem descrever o problema com precisão [23]. Muitos componentes do sistema de energia respondem dinamicamente a distúrbios não sendo as suas repostas instantâneas. Dependendo da natureza das perturbações na rede e do objectivo do estudo, este tipo de modelos pode assumir maior ou menor importância [8].

2.2.3. Modelização de carga recorrendo a medição directa

Esta metodologia consiste em obter dados a partir do sistema real usando procedimentos de medição. Este método requer normalmente medição de potência activa (P) e reactiva (Q),

perante variações graduais da tensão dentro dos limites impostos. A variação da tensão nestes estudos pode ser feita com recurso a autotransformadores.

Depois de feitas as medições os dados são tratados de forma a obter parâmetros e assim caracterizar o comportamento da carga. Com o recurso à medição directa obtém-se uma representação real da carga, estando no entanto essa medição sujeita às suas variações naturais (variação com condições ambientais, dias da semana, etc.) [24]. Este não é um modelo físico, é um modelo empírico construído por regressão das variáveis medidas.

2.3. Equipamentos de Regulação da Tensão

2.3.1. Estabilizadores de tensão

São equipamentos vocacionados para a protecção dos mais variados elementos eléctricos presentes no sector doméstico e principalmente em escritórios. Constituem uma solução com baixa manutenção e de fácil acomodação em qualquer lugar dada a sua reduzida dimensão. É possível com a sua utilização obter uma fonte de alimentação estável e livre de perturbações ou interferências exteriores.

Os sistemas eléctricos para funcionarem de forma correcta necessitam de uma alimentação com qualidade suficiente para garantir um bom desempenho e prolongar o seu tempo de vida útil de funcionamento. Tensões baixas podem reduzir a eficácia dos equipamentos e tensões altas reduzem o tempo de vida e a eficiência energética. Ao baixar a tensão além de um certo nível há equipamentos que são forçados a desligar-se como já foi visto anteriormente [15].

Cada equipamento eléctrico é concebido para funcionar dentro de uma determinada gama de valores de tensão, porém não necessariamente com um óptimo desempenho para todos esses valores. Quando o nível de tensão está fora da sua gama operacional, o dispositivo pode ser incapaz de ligar ou funcionar, pode funcionar mal ou pode mesmo ser danificado.

A gama de valores para a qual o dispositivo irá funcionar é uma medida da sua sensibilidade. Um equipamento que funcione bem para um intervalo de $\pm 10\%$ da tensão nominal pode ser considerado como um dispositivo de baixa sensibilidade, mas um equipamento que somente funciona correctamente quando o nível de tensão é de $\pm 5\%$ ou menos da tensão nominal seria considerado sensível às variações de tensão.

Os problemas com a variação da tensão no fornecimento de energia podem ter causas muito variadas, como falhas na rede de distribuição, condições ambientais ou utilização de equipamentos com potências muito elevadas principalmente em redes mais fracas. A contínua variação da carga e a extensão das linhas de transmissão são os principais factores que contribuem para a variação da tensão [25]. Dada a natureza da electricidade a variação

da tensão é comum em qualquer sistema eléctrico desde o barramento de uma central até aos equipamentos de utilização.

Um regulador de tensão é projectado para automaticamente manter a tensão constante num nível estabelecido. Com a mesma finalidade de controlo da tensão podem ser encontrados diferentes tipos de estabilizadores, quer na forma de construção, quer na potência para à qual são destinados. Podem ser consideradas duas unidades principais, unidade de medida e unidade de regulação. A função da unidade de medida é detectar mudanças na entrada ou saída provocando a actuação do estabilizador que gera um sinal para mover os valores da tensão para a gama pretendida do sistema de regulação.

Alguns tipos de estabilizadores de tensão mais comuns são [25]:

- Electromecânicos;
- Reguladores electrónicos de passo;
- Transformador de tensão constante (ferro ressonante).

Estabilizadores Electromecânicos

Num sistema de distribuição de energia estes reguladores de tensão podem ser usados em subestações e ao longo das linhas de distribuição de modo a que todos os consumidores recebam a mesma tensão independentemente da quantidade de energia que consomem.

Existem dois métodos principais utilizando reguladores de tensão com componentes mecânicos, sendo um por alteração da relação do número de espiras entre o primário e o secundário e outro por alteração da indução magnética entre as duas bobinas do transformador.

Um regulador de tensão electromecânico com variação da relação do número de espiras é normalmente constituído pelas seguintes partes [25]:

1. Circuito de controlo;
2. Servomotor;
3. Transformador;
4. Autotransformador variável.

O servomotor apresenta movimento proporcional ao sinal de comando proveniente do circuito de controlo, verifica a sua posição actual e actua no sistema indo para a posição desejada. Este tipo de motor não gira indefinidamente, ao contrário dos outros tipos de motores, mas permite um melhor controlo da rotação, binário constante e precisão de posição.

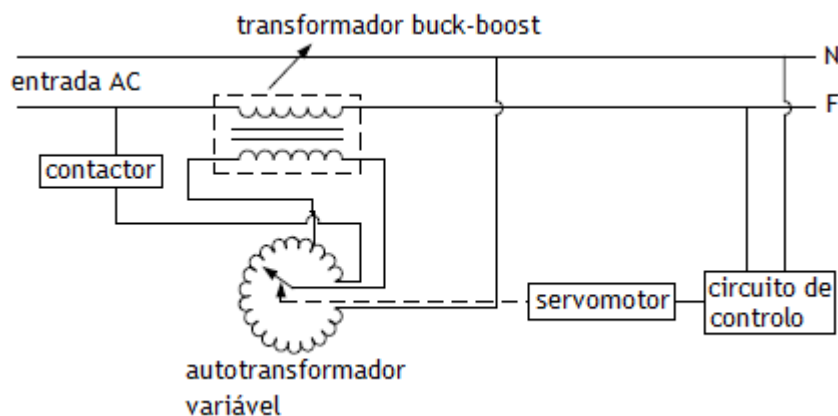


Figura 2.8 - Diagrama de um estabilizador electromecânico [25].

O eixo do servomotor é acoplado mecanicamente ao autotransformador permitindo controlar a tensão nos seus terminais. O princípio de funcionamento de um autotransformador é semelhante ao transformador convencional mas a sua estrutura é feita de forma a ser possível mudar o número de espiras do secundário alterando a tensão de saída. Um autotransformador variável é normalmente constituído por um núcleo toroidal e uma escova de carbono que faz o contacto com as espiras na posição desejada, permitindo obter na saída tensão a variar de zero até 120% da tensão de entrada [25].

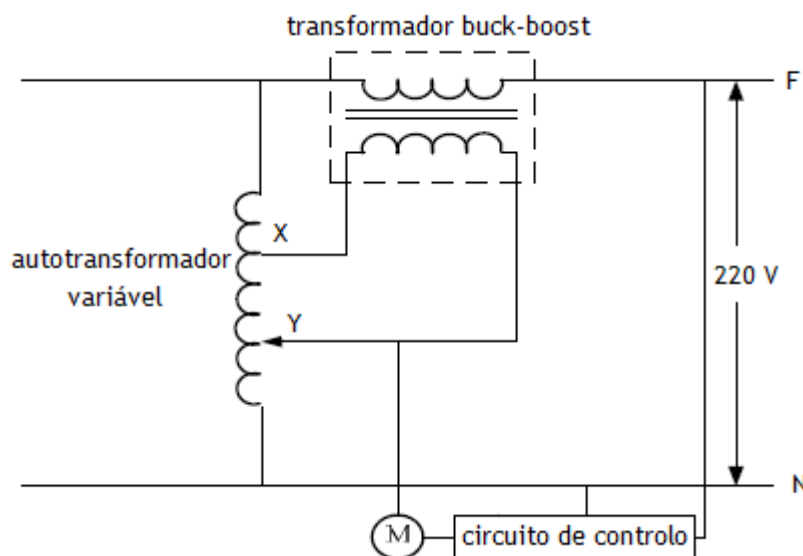


Figura 2.9 - Diagrama de controlo do transformador *Buck-boost* [25].

Quando a tensão de entrada varia saindo da gama predefinida o servomotor actua de forma a manter a tensão na saída nos valores estabelecidos, variando a posição de Y na figura anterior.

O transformador *Buck-boost* através da ligação com o autotransformador faz subir ou descer a tensão na linha. A subida ou descida depende da tensão que está aplicada no primário do transformador *Bock-boost* e a tensão de saída depende da posição da escova de

carbono no autotransformador (figura 2.9). Quando a tensão na linha (primário do transformador *Buck-boost*) é baixa é induzida uma tensão a partir do secundário para que a soma das duas faça subir esse valor (conexão *boost*). No caso da tensão na linha estar alta é induzida uma tensão negativa para obter o valor pretendido (conexão *buck*).

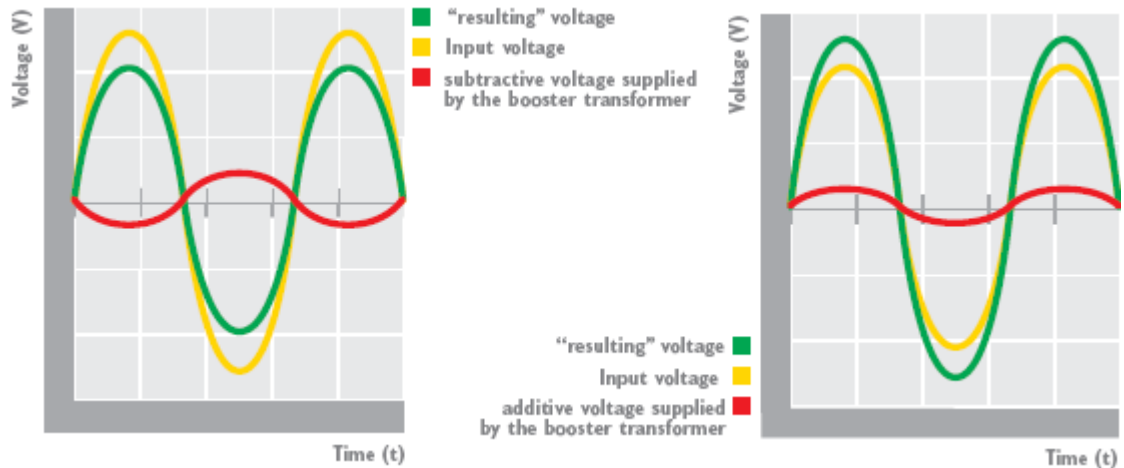


Figura 2.10 - Princípio de funcionamento do regulador [26].

Este sistema de regulação fornece uma boa resposta. No entanto, devido à inércia das suas partes mecânicas não tem boa dinâmica [27]. Dependendo da finalidade a resposta pode não ser suficientemente rápida. Apesar dessas condicionantes, este método é muito popular e muito usado pois apresenta preços muito competitivos [28].

O regulador de indução magnética funciona por alteração da orientação física entre o primário e o secundário do transformador, alterando assim também a tensão na saída.

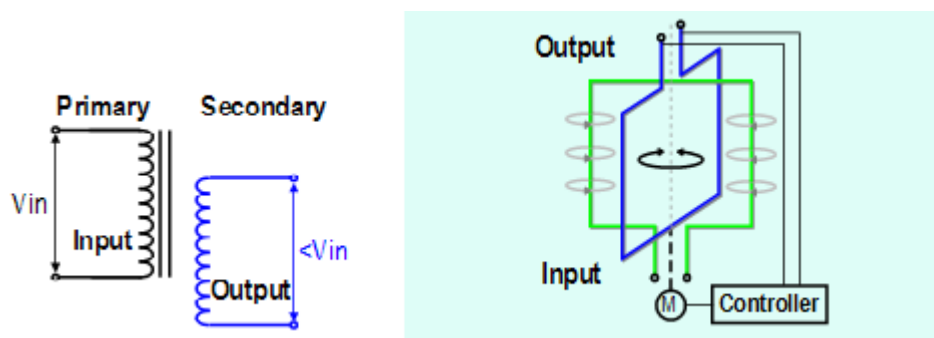


Figura 2.11 - Modo de funcionamento do estabilizador por indução magnética [13].

No enrolamento do primário é produzido o fluxo magnético que induz a corrente no secundário, ao mudar o posicionamento do enrolamento do secundário no campo magnético a corrente induzida vai ser alterada e assim também a tensão [13].

Quando a bobina móvel está posicionada de forma perpendicular à bobina fixa, as forças magnéticas que nela actuam anulam-se e a tensão de saída mantém-se inalterada. Ao rodar a bobina num sentido ou no outro a partir da posição central vai aumentar ou diminuir a tensão na bobina do secundário (móvel) [29].

Este tipo de regulador pode ser automatizado através de um sistema de controlo e um servomotor de forma a controlar a posição da bobina móvel, a fim de proporcionar o aumento ou diminuição da tensão. Neste caso é necessário ter mecanismos de travagem ou engrenagens para controlar a posição da bobina tendo em conta as poderosas forças magnéticas que actuam sobre esta.

Estabilizadores Electrónicos

São usados em dispositivos como computadores, estabilizando a tensão DC usada no processador e em outros elementos [25] uma vez que representam uma solução mais competitiva para potências mais baixas. Estes reguladores têm evoluído com o avanço dos semicondutores, com as suas vantagens de velocidade e desempenho é possível obter um melhor ajuste da tensão em relação aos reguladores mecânicos, sendo no entanto mais caros.

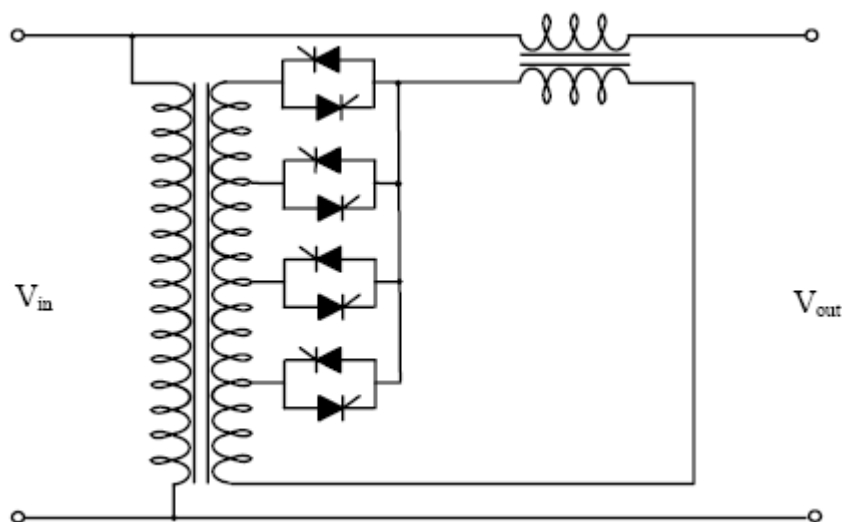


Figura 2.12 - Esquema de um estabilizador electrónico [27].

O princípio de funcionamento deste regulador é acrescentar ou subtrair o número de espiras do secundário do transformador usando semicondutores. Como não tem partes móveis não provoca desgaste dos seus componentes, o ruído provocado é assim minimizado. A regulação depende do número de pontos de ligação disponíveis (número de semicondutores), para melhorar o controlo são necessários mais pontos o que leva ao aumento do seu custo e complexidade [27].

Regulador Ferro-ressonante

Reguladores de circuito ferro-ressonante operam na gama de fluxo saturado. Mesmo para uma variação ampla da tensão de alimentação é produzida uma saída com uma tensão constante, no entanto a saída não é sinusoidal especialmente para cargas não lineares.

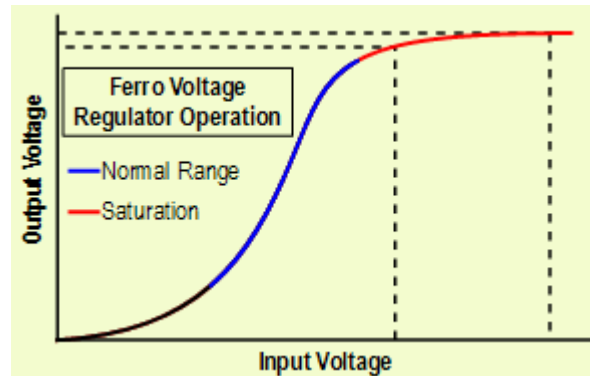


Figura 2.13 - Curva de magnetização [13].

Na zona de saturação mudanças relativamente grandes na tensão de entrada resultam em pequenas mudanças na tensão de saída (curva a vermelho da figura 2.13). Nesta zona de funcionamento a eficiência é bastante baixa.

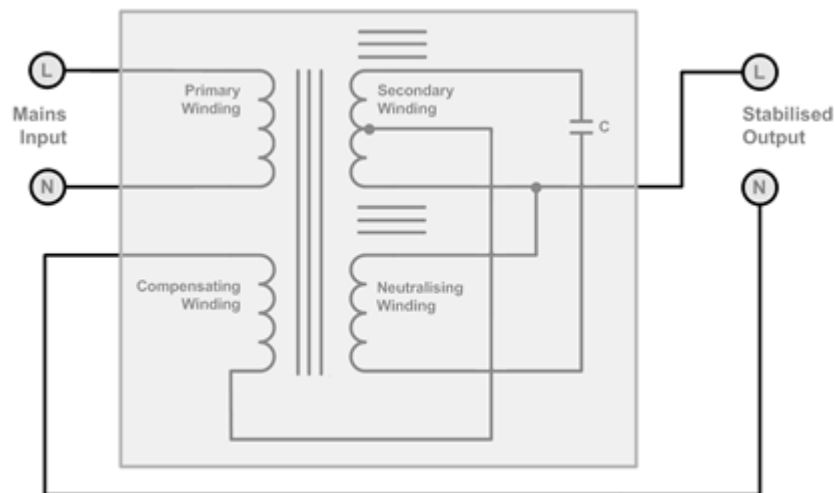


Figura 2.14 - Esquema de um estabilizador Ferro-ressonante [28].

Como não tem partes móveis nem circuito de controlo é um sistema que não necessita de manutenção, pode também suportar altos valores de sobrecarga instantâneos apresentando uma rápida resposta às variações de tensão. Tem a desvantagem de ser pouco competitivo para valores acima de 10 kVA e ter uma forte relação do seu peso com a potência [28]. Estes

reguladores são constituídos por uma estrutura magnética especial e por um condensador. A limitação da corrente é um benefício inerente a estes transformadores, a corrente do secundário é limitada a um nível seguro [30]. A sua eficiência pode ir até 92% quando à plena carga e em condições ideais, mas com cargas mais pequenas a sua eficiência baixa consideravelmente.

No gráfico da figura 2.15 é possível verificar a variação da eficiência do transformador com a percentagem de carga. Para 50% da carga o regulador tem uma eficiência de 75-80% o que é baixo, um transformador convencional para este valor de carga apresenta uma eficiência típica de 90% ou mais.

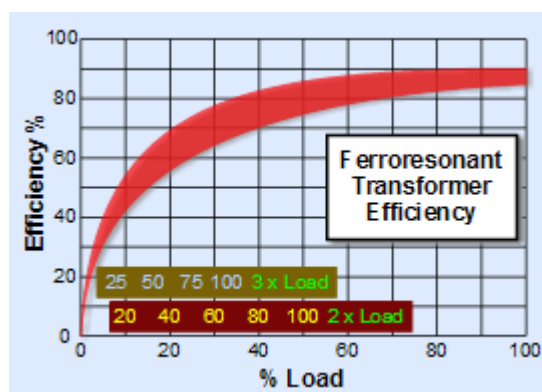


Figura 2.15- Curva de eficiência do regulador [13].

Em casos em que o regulador de tensão é sobredimensionado para permitir a passagem de maior corrente a sua eficiência é reduzida. As escalas na parte inferior do gráfico mostram o que acontece com a eficiência quando o regulador é sobredimensionado por um factor de duas ou três vezes da carga, como se pode verificar há uma forte redução da eficiência.

2.3.2. Reguladores do nível de tensão (eficiência)

A regulação de tensão representa uma grande importância nas redes de distribuição de energia. A qualidade de serviço prestado pela rede é medida em vários aspectos como a continuidade de serviço, qualidade da onda de tensão e qualidade do serviço comercial [31]. No que se refere à qualidade da onda de tensão esta deve manter-se dentro dos níveis necessários ao utilizador.

A Tensão Nominal das Redes de Distribuição (Públicas) em Baixa Tensão foi durante muito tempo de 220/380 (monofásico/trifásico), actualmente encontra-se harmonizada no valor de 230/400V, com tolerância de +6% e -10% [32]. Esta tolerância permite encontrar na rede nacional de baixa tensão, tensões a variar entre 207 e 243,8V. Não sendo aqui consideradas

sobretensões transitórias ou variações temporais resultantes de manobras ou defeitos na rede de alimentação.

Nos sistemas de distribuição de energia as tensões variam muito ao longo dos ramos (exemplo na figura 2.16) principalmente em redes radiais longas e em redes onde existem menos dispositivos capazes de fazer o controlo da tensão.

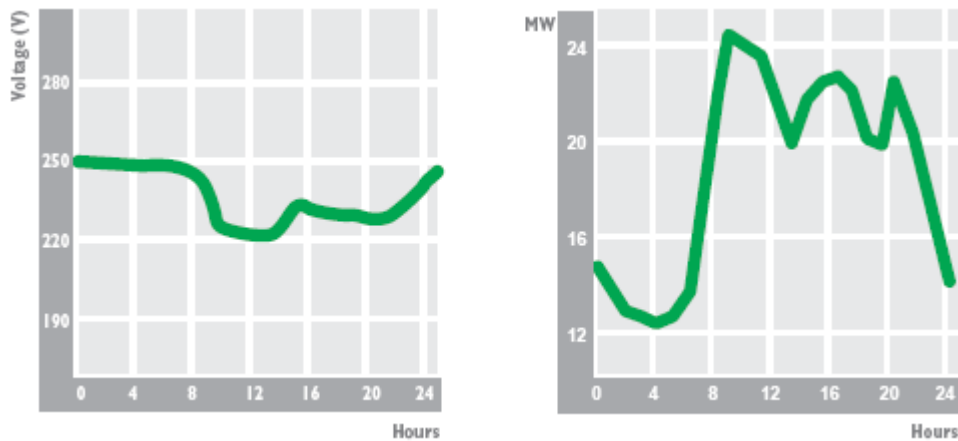


Figura 2.16 - Variação da tensão ao longo do dia (gráfico da esquerda) e potência consumida na mesma área (gráfico da direita) Turim - Itália [26].

Os equipamentos eléctricos ligados à rede podem funcionar de acordo com uma gama de tensões definida pelo fabricante, muitos destes equipamentos ao serem alimentados a tensões diferentes apresentam uma potência de carga também ela diferente.

A manutenção de uma tensão constantemente alta reduz o tempo de vida dos equipamentos eléctricos [4], sendo também por isso importante a sua regulação.

Reguladores de fluxo luminoso

A utilização destes equipamentos tem-se verificado em várias cidades do país através de vários planos de eficiência energética. O Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética (PNAEE) engloba um vasto conjunto de programas e medidas, nomeadamente o programa “Eficiência Energética no Estado” que contém medidas de melhoria da eficiência energética na iluminação pública através da colocação de reguladores de fluxo luminoso [33].

A utilização de reguladores de fluxo permite adaptar o nível de iluminação de acordo com a necessidade num determinado período de tempo e para um dado espaço tendo sempre em consideração a manutenção de um nível de iluminação uniforme.

O princípio de funcionamento destes reguladores consiste no controlo da tensão de alimentação do circuito de modo a reduzir a potência absorvida mantendo um nível de iluminação aceitável. Assim é reduzido o consumo de energia mantendo a qualidade e segurança do local a iluminar [34]. A nova geração de reguladores de fluxo é composta por

inversores para controlar a tensão e a frequência otimizando as condições de regulação. Estes dispositivos permitem ter uma tensão de alimentação estabilizada num valor definido, protegendo assim as lâmpadas contra alterações bruscas da tensão ou sobretensões. Isto conduz a um aumento do tempo de vida das lâmpadas e menor necessidade de manutenção, permitindo assim a redução de custos associados a estes factores.

Durante a vida útil de uma instalação de Iluminação Pública os custos com a manutenção chegam a ser de 50% do total (figura 2.17), assim ao reduzir a manutenção estes encargos são também reduzidos.

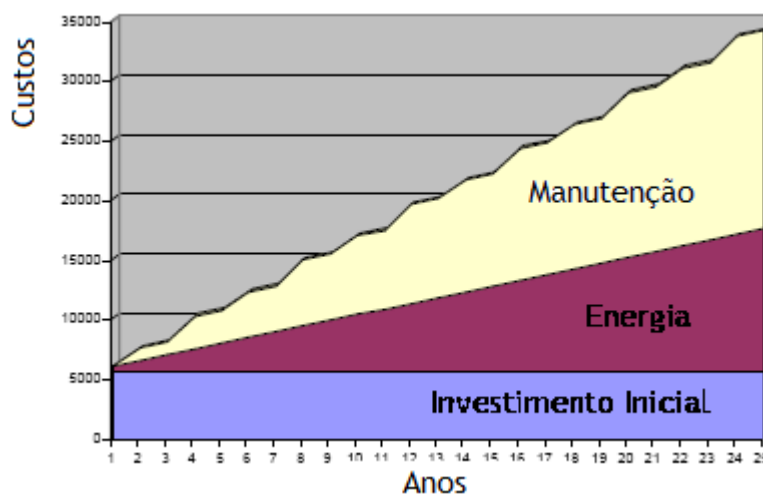


Figura 2.17 - Custos durante a vida útil de uma instalação de Iluminação Pública [35].

Com a utilização de reguladores de fluxo luminoso estão previstas reduções na potência absorvida na ordem de 30 a 40% [36]. A economia será proporcional ao valor de redução da tensão, ou seja, quanto maior o valor da redução da tensão maior será a economia obtida.

A percepção do olho humano em relação à luz não varia linearmente, de facto, apenas para uma variação superior a 10% do fluxo luminoso é que a diferença é notada [37]. Uma redução de 10% de fluxo luminoso não afecta a qualidade de serviço mas traduz-se em economia.

Uma das principais vantagens da regulação de tensão está relacionada com a poupança energética nas horas de pouco consumo. À noite, devido à saída de uma parte significativa da carga verificada durante o dia, a tensão eléctrica tende a aumentar provocando o envelhecimento precoce das lâmpadas, nessas horas não se justifica a elevada luminosidade uma vez que a actividade nocturna é reduzida.

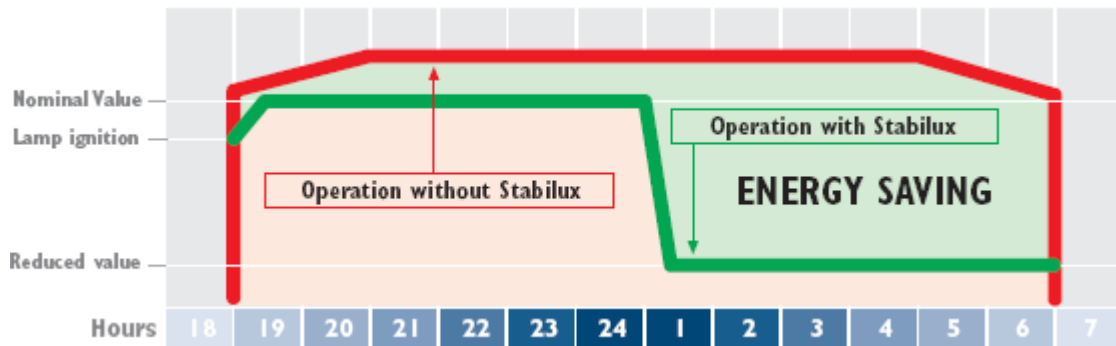


Figura 2.18 - Diagrama de funcionamento e economia de energia [26].

O nível de iluminação deve ser maior durante as horas de grande utilização e diminuir à medida que o uso diminui. Quando o nível máximo de iluminação já não é necessário, o regulador reduz a tensão aplicada as lâmpadas como representado na figura 2.18. Estas transições entre as diferentes condições de trabalho são lentas pelo que a mudança na iluminação não é perceptível aos utilizadores. Mesmo perante variações significativas na tensão de alimentação a tensão da saída é aproximadamente constante no valor predefinido.

O princípio aplicado a instalações de iluminação pública pode também ser usado em zonas interiores, sendo o regulador adaptado para satisfazer as necessidades da instalação. Os locais indicados para a aplicação são: parques de estacionamento, portos, aeroportos industriais, hotéis, centros comerciais, centros desportivos, escritórios, bancos, lojas, armazéns, escolas e hospitais. Nestes locais podem ser alcançadas economias energéticas de 15 a 40% [38].

Tal como para os estabilizadores de tensão também existem diferentes tecnologias de reguladores de fluxo luminoso.

Reguladores de fluxo electromagnéticos

Refere-se ao uso de autotransformadores com tomadas variáveis para ajuste da tensão que alimenta o circuito. Este tipo de tecnologia apresenta características como [39]:

- Não necessita de grandes mudanças na infra-estrutura da rede de iluminação;
- A variação de tensão é limitada pela limitação técnica do autotransformador;
- O autotransformador é relativamente espaçoso e é pouco eficiente para baixos níveis de tensão;
- Uma transição contínua entre níveis de tensão não é fácil;
- Apresenta boa tolerância a condições exteriores adversas.

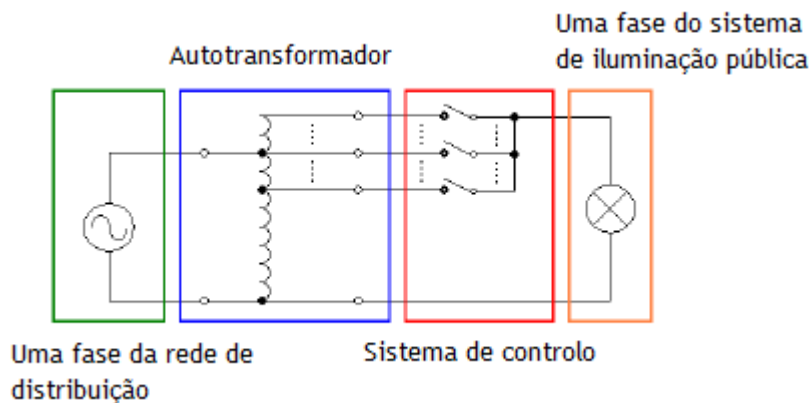


Figura 2.19 - Regulação da Tensão para um sistema de iluminação pública [40].

Reguladores de fluxo electrónicos

A abordagem electrónica refere-se ao uso de balastos electrónicos em que são vistas algumas das seguintes características [39]:

- O uso de balastos electrónicos (reguláveis) permite um maior grau de controlo da iluminação;
- Uma central de controlo é necessária para obter um controlo uniformizado;
- Apresenta um elevado custo de instalação devido à necessidade de substituir os balastos magnéticos por balastos electrónicos;
- Os balastos electrónicos são mais caros e com menor fiabilidade do que os balastos magnéticos;
- A tolerância a condições meteorológicas adversas é muito baixa.

Reguladores de tensão específicos para eficiência energética

Com as crescentes preocupações com a eficiência energética e correcta utilização dos recursos existentes, têm surgido nos últimos anos equipamentos de regulação da tensão que visam obter poupanças reduzindo o consumo. Este princípio já aplicado em sistemas de iluminação pública começa a ser generalizado a outro tipo de equipamentos.

Os reguladores de tensão recebem a tensão de alimentação da rede e aplicam a energia e tensão adequada a cada aplicação. Como resultado apenas a “Tensão Certa” é transmitida aos dispositivos controlados maximizando a eficiência energética (figura 2.20) [41].

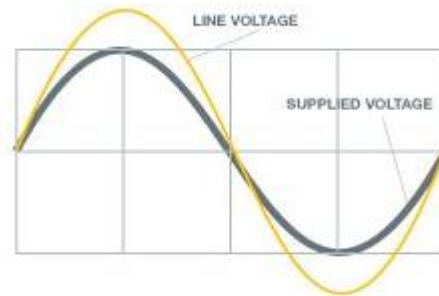


Figura 2.20 - “Tensão Certa” a aplicar ao consumo [41].

Adicionalmente são garantidas outras poupanças indirectas com a manutenção e com o menor desgaste dos equipamentos prolongando o seu tempo de vida útil.

De forma a verificar a utilidade destes sistemas é sempre necessário traçar o perfil energético antes e depois da aplicação do equipamento de forma a poder tirar conclusões sobre a eficiência obtida.

O método de redução de tensão pode ser aplicado também a consumidores individuais de forma a satisfazer as exigências de economia de energia.

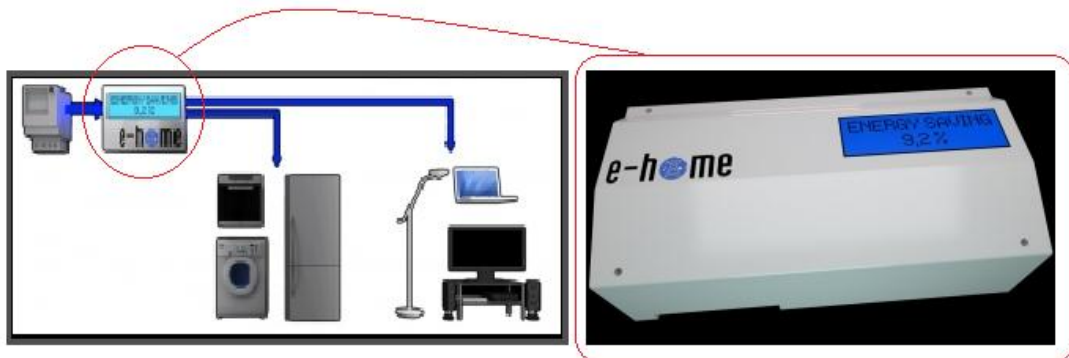


Figura 2.21 - Aplicação do regulador de tensão no sector doméstico [42].

Instalado logo depois do quadro eléctrico, o sistema ajusta e estabiliza a tensão fornecida aos equipamentos domésticos. Através da regulação da tensão e corrente permite o controlo da fonte de alimentação eliminando possíveis perdas em calor do sistema [42]. Este equipamento pode ser aplicado em residências e pequenos escritórios com potência instalada até 9 kVA com cargas como iluminação, televisões, fogões, arcas, frigoríficos, etc.

O fabricante do equipamento [42] apresenta as seguintes vantagens:

- Diminuição da potência reactiva consumida e conseqüente aumento do factor de potência;
- Filtragem dos picos de tensão da rede aos quais os equipamentos estavam sujeitos;
- Redução do consumo dos equipamentos na ordem dos 10%;

- Prolongamento do tempo de vida dos equipamentos e com isso diminuição da frequência com que têm de ser substituídos;
- Redução significativa das emissões de CO₂ do sistema.

O custo destes equipamentos constitui o principal entrave à sua utilização sendo a sua principal desvantagem.

Grande parte dos equipamentos eléctricos (máquinas, lâmpadas, aquecedores, etc.) são construídos para funcionar com uma tensão de 220V [43] no entanto a tensão na rede muitas vezes anda à volta dos 240V (Reino Unido). A redução de tensão é o processo que permite baixar a tensão de entrada do nível desnecessariamente alto para o novo nível de tensão mais baixo. Uma redução de consumo de aproximadamente 20% pode ser obtida ao baixar o nível de tensão de 240 para 220V. O valor exacto para a redução depende dos tipos de carga presentes no ponto de consumo, da frequência com que as cargas são utilizadas e do nível de tensão fornecido pela rede [44]. O tempo de retorno do investimento está assim dependente da percentagem de redução de consumo alcançada, tipicamente varia entre 18 meses e 5 anos.

Em alguns tipos de carga não é possível reduzir o consumo por alteração da tensão. Como visto anteriormente, cargas em que a tensão é gerada electronicamente não são afectadas pela regulação da tensão da rede. Aquecedores com controlo de temperatura representam outra categoria em que não é possível reduzir o consumo pois continuam a necessitar da mesma quantidade de energia para funcionar com a qualidade requerida.

Estudos indicam que no Reino Unido a tensão média da rede é de aproximadamente 242V, na figura 2.22 é representada a diferença do nível de tensão entre dia e noite e também nos fins-de-semana.

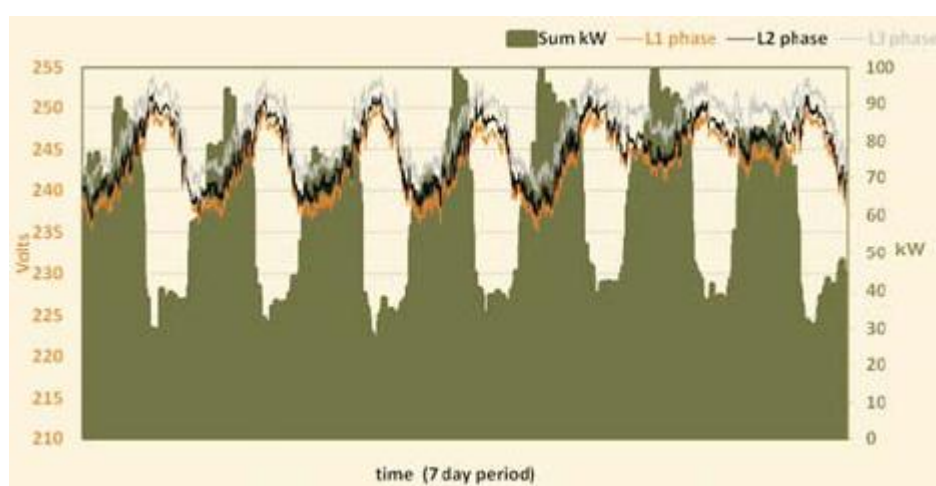


Figura 2.22 - Níveis de tensão típicos em locais de comércio [45] no Reino Unido.

Um outro aspecto a salientar é o desequilíbrio entre as fases, outra causa de ineficiência.

Actualmente é considerada a tensão de 230V -15% +10% (195,5 a 253,0V) como uma gama apropriada ao funcionamento dos equipamentos eléctricos. Os fabricantes e fornecedores do Reino Unido e Europa (mercado CE) são obrigados a assegurar o correcto funcionamento desses equipamentos para a gama de tensão referida.

A redução da tensão pode ser feita de várias formas entre as quais a utilização de um transformador abaixador fixo.

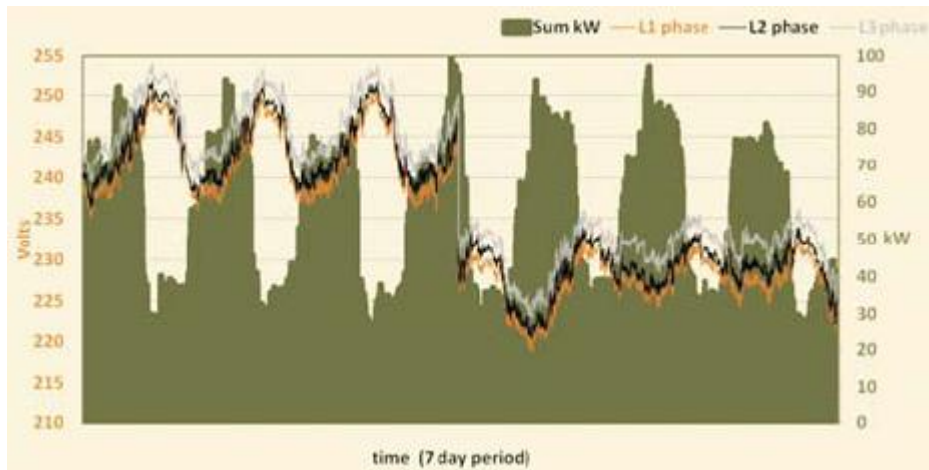


Figura 2.23 - Alimentação utilizando um transformador abaixador com redução de 7% da tensão [45].

Com este método a eficiência não é maximizada uma vez que não há possibilidade de controlo. Quando a tensão baixar no primário do transformador isso vai ser reflectido no secundário (figura 2.23), o que em certos casos pode ser prejudicial.

Outro método de otimizar a tensão de alimentação é através da instalação de um regulador de tensão, assim com um controlo activo é possível regular o valor de tensão na saída. Como cada fase pode ser controlada de forma independente é possível eliminar a diferença entre elas, o que aumenta a eficiência nos equipamentos trifásicos.

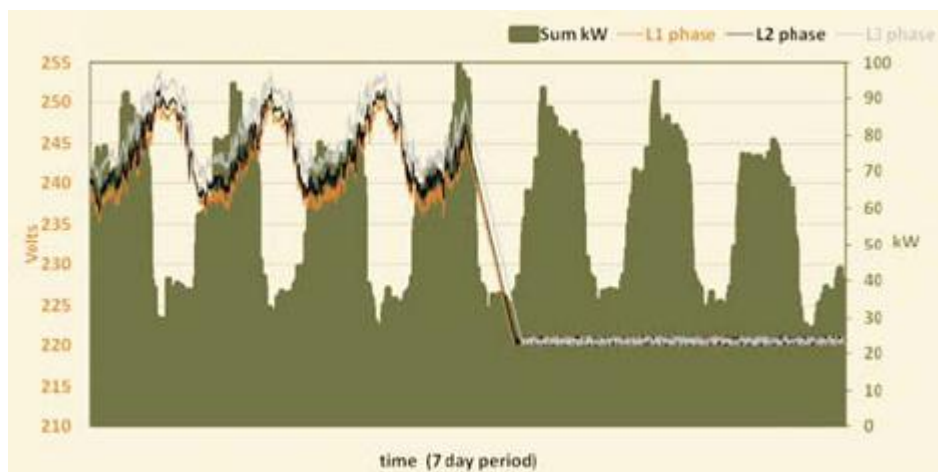


Figura 2.24 - Alimentação com a tensão regulada para 220V [45].

Este regulador tem um custo superior ao transformador fixo, mas o aumento de eficiência que proporciona e o equilíbrio entre fases justifica o maior custo.

Em casos de aplicações reais em que o sistema de regulação já foi implementado é possível verificar os valores de tensão antes e depois da instalação do regulador (figura 2.24 e 2.25), reduzindo a potência consumida e a energia (figura 2.26).

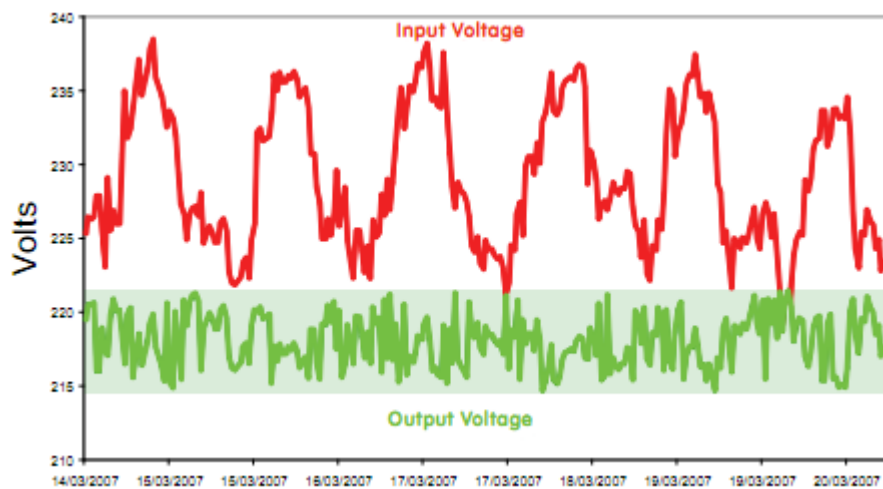


Figura 2.25 - Exemplo da variação da tensão [46].

O gráfico da figura anterior mostra uma entrada de tensão típica de alguns locais e a tensão de saída regulada para a gama de valores pretendidos. Neste exemplo o controlo é baseado em tirístores que fazem o ajuste do regulador nas situações de desvio da tensão para fora dos limites pré-estabelecidos. A capacidade de ajustar a tensão para valores superiores ao valor de entrada pode ser também importante no caso de se verificarem subtensões, como acontece vulgarmente com o arranque de motores [46].

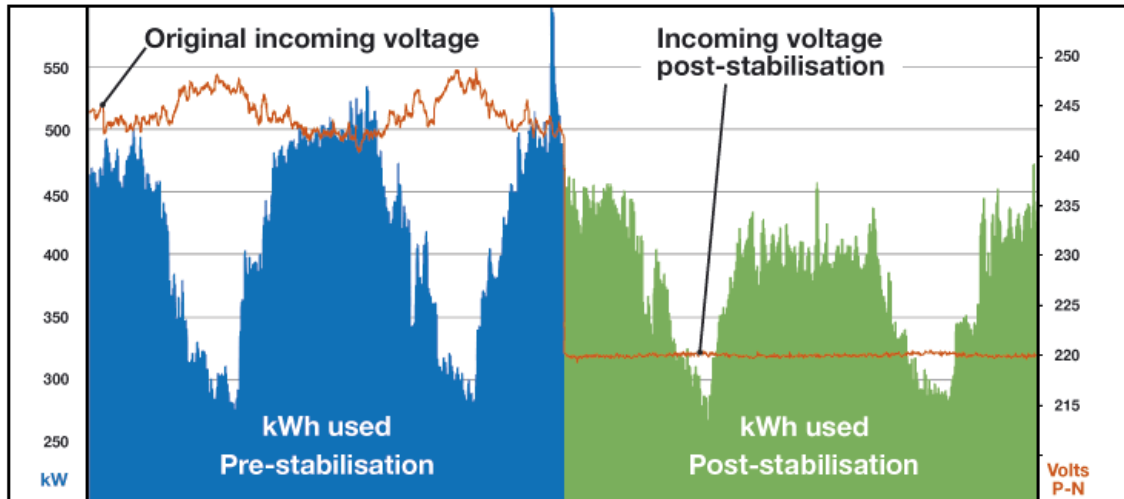


Figura 2.26 - Consumo de energia antes e depois da instalação do regulador [44].

Optimizar a tensão de alimentação permite que os equipamentos utilizem apenas a energia necessária para operar de forma eficiente.

A eficiência energética é a forma mais rápida, mais barata e a maneira mais limpa de reduzir o uso de energia, provocando assim também menores emissão de gases com efeito de estufa. A Agência Internacional de Energia destaca que a eficiência energética contribuiu mais para satisfazer o crescimento da procura de energia nos últimos 30 anos do que qualquer outro método. É o “combustível” dominante do mundo desenvolvido [47].

Capítulo 3

Modelização de Cargas

A eficácia da redução do consumo através da regulação da tensão está dependente de vários aspectos relacionados com a carga e a tensão no ponto em estudo, para compreender a importância de cada um destes aspectos foi feito o estudo das várias variáveis e do seu impacto na redução de consumo.

Para tirar conclusões acerca da poupança alcançável foi necessário formular modelos do comportamento do consumo energético e da influência deste em todo o sistema.

Neste capítulo é descrita a metodologia desenvolvida, com todos os pressupostos assumidos, formulações matemáticas e detalhes de simulação.

3.1. Caracterização do Consumo

Como a redução de consumo está dependente do tipo de cargas é importante saber qual é o seu comportamento, a que horas essas cargas estão ligadas e o peso que representam no diagrama de cargas quando estão em funcionamento. Cada tipo de equipamento apresenta horas de maior utilização de acordo com a sua função e utilidade, para estudar a redução de consumo com a redução de tensão é necessário ter em conta esses horários de utilização.

Existe uma grande variedade de consumidores, cada um com tipos de carga diferentes, pelo que para representar o maior número possível desses consumidores é necessário criar cenários representativos. Estes cenários devem ser próximos do valor de consumo real para que o resultado obtido com o cálculo da redução de consumo seja também ele próximo do valor real. Por isso foi considerada a distribuição pelos diferentes equipamentos presente na figura 3.1.

36 Modelização de Cargas

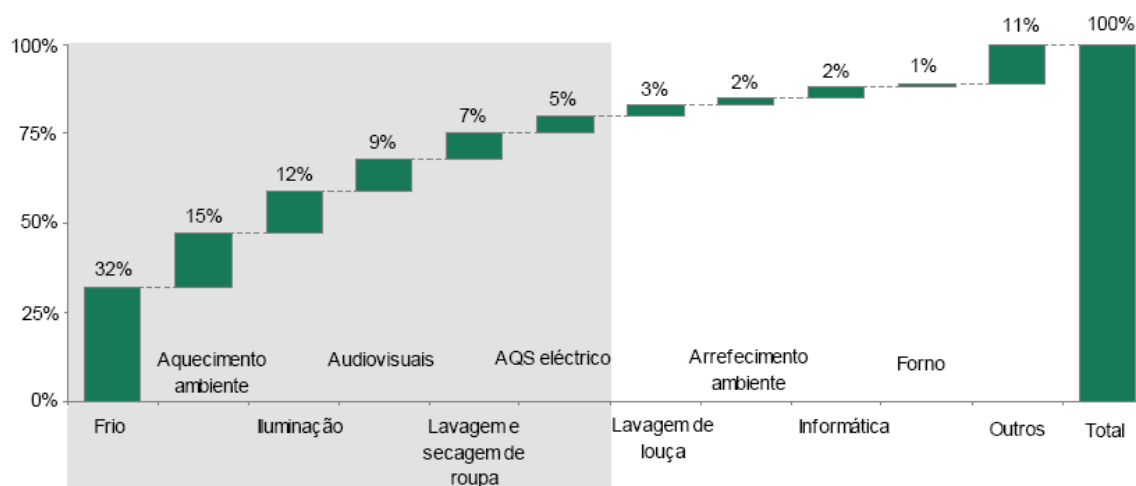


Figura 3.1 - Repartição dos consumos pelos diferentes tipos de carga no sector residencial (retirado de [33] - PNAEE).

Grande parte do consumo no sector residencial está ligado a sistemas de frio (frigorífico, combinado e congelador) sendo este um tipo de carga importante a considerar na redução de consumo neste sector. Os sistemas de aquecimento e iluminação são também importantes pois têm uma elevada percentagem no consumo total.

No gráfico seguinte (figura 3.2) é indicada a taxa de posse dos diferentes equipamentos referidos no gráfico anterior.

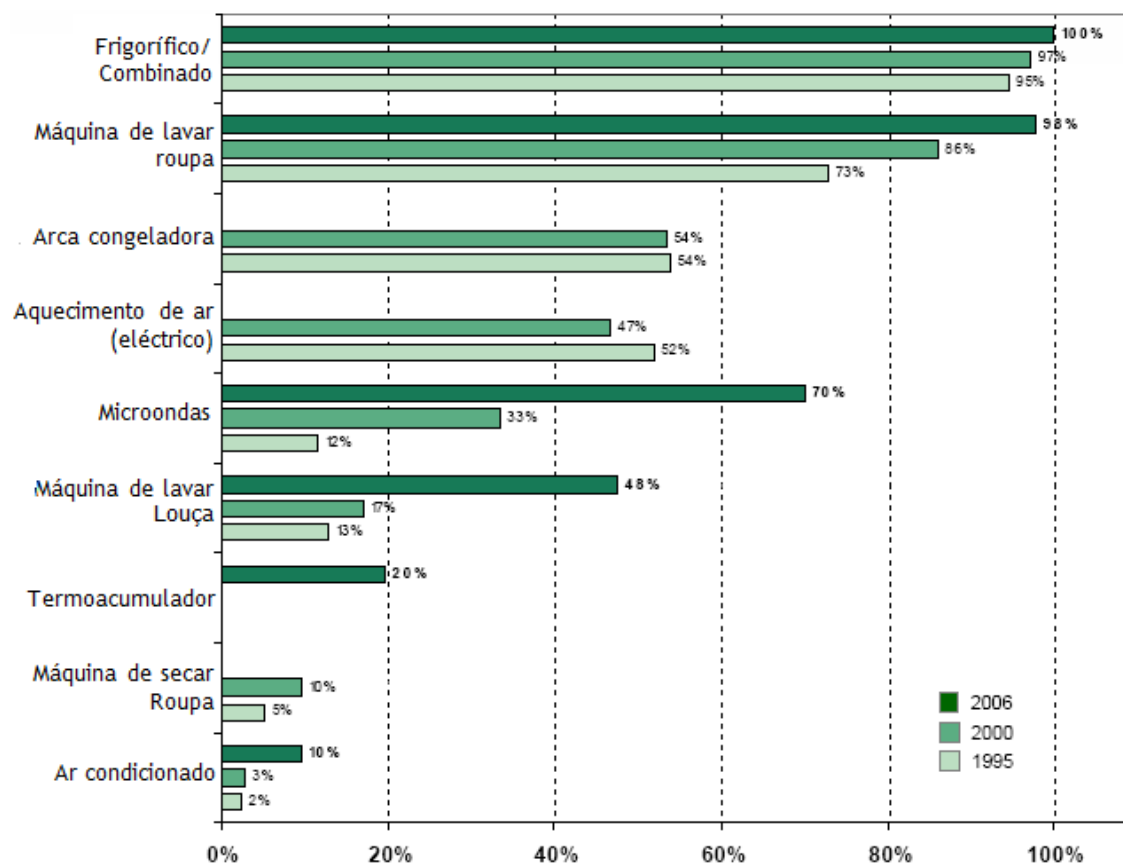


Figura 3.2 - Evolução da taxa de posse dos diferentes equipamentos (retirado de [33] - PNAEE).

Cada vez mais se dá importância ao conforto nas habitações, pelo que é notório o crescente uso de equipamentos eléctricos. A energia eléctrica é uma forma cómoda de satisfazer as necessidades de energia, também por isso a aposta na eficiência destes equipamentos é cada vez mais importante.

Um aspecto importante na redução do consumo está relacionado com o horário de utilização de cada um dos equipamentos uma vez que, como o nível de tensão varia ao longo do dia, o potencial de redução está dependente do horário de utilização.

O diagrama de carga horário para o sector residencial desagregado pelos principais usos finais, é ilustrado na figura seguinte. Esta figura revela que três das utilizações específicas de electricidade (iluminação, equipamentos de frio e audiovisual) representam, no período de vazio, mais de um terço da potência total solicitada.

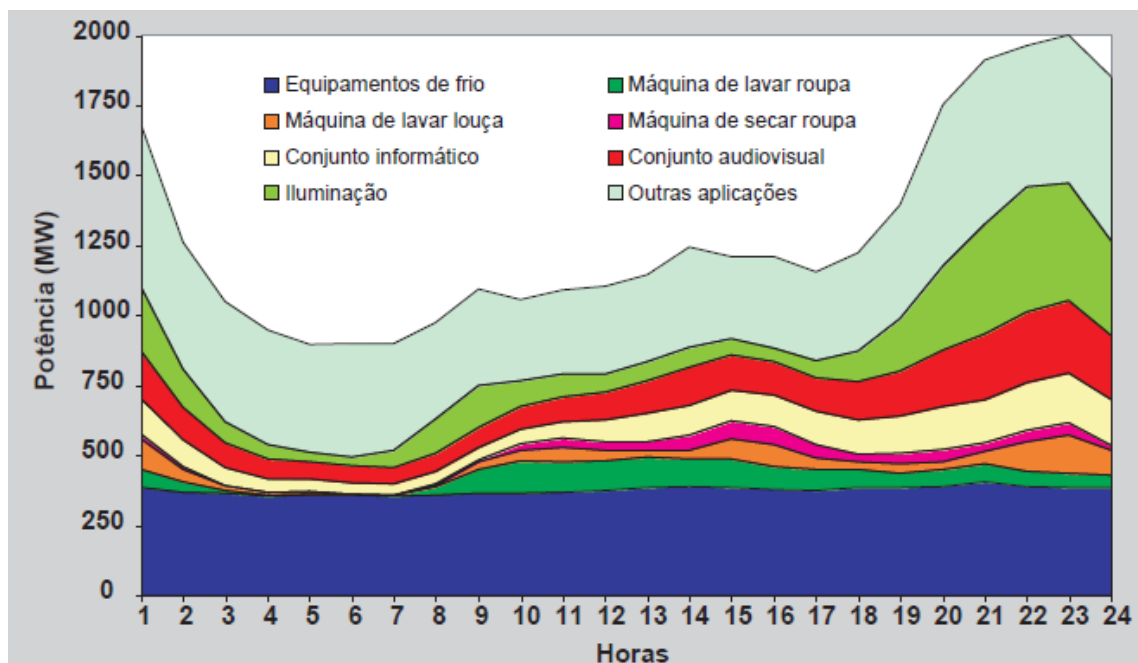


Figura 3.3 - Diagrama de carga para os diferentes equipamentos [48].

3.1.1. Equipamentos de frio

O funcionamento dos equipamentos de frio é cíclico, em que uma parte do ciclo corresponde ao funcionamento à potência estipulada e a outra à paragem do compressor, como se visualiza na figura seguinte. Como estes equipamentos têm maior utilização nas horas de cheia do diagrama de cargas (horas em que é mais comum as pessoas estarem em casa), é natural que tenha um consumo ligeiramente superior nessas horas, a maior frequência de abertura da porta de acesso a tais equipamentos vai originar tempos médios de funcionamento mais prolongados para manter a temperatura pretendida.

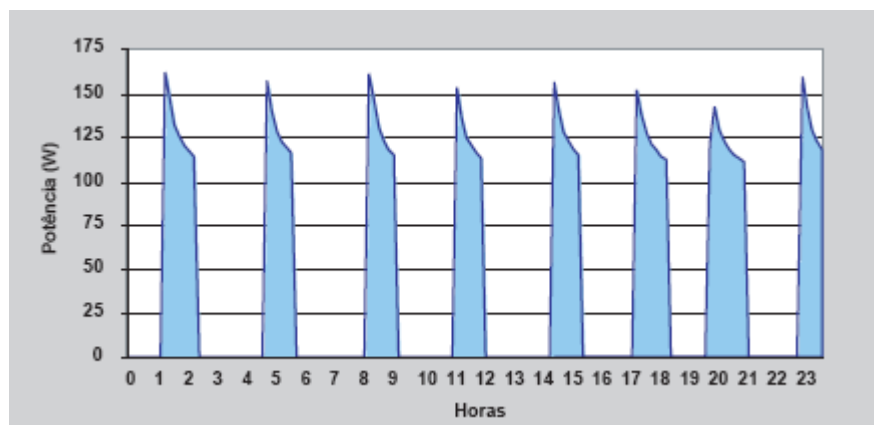


Figura 3.4 - Perfil de funcionamento de um combinado [48].

Praticamente todo o consumo destes equipamentos é devido ao funcionamento do compressor. O funcionamento eficiente do compressor é por isso essencial na redução de consumo dada a sua elevada percentagem no consumo total e a sua elevada taxa de posse.

3.1.2. Iluminação

O consumo médio anual em iluminação por unidade de alojamento é equivalente a 12% do consumo de electricidade no sector residencial.

As lâmpadas usuais para o consumo doméstico são as lâmpadas incandescentes (clássicas ou de halogéneo) e as lâmpadas fluorescentes (tubulares ou compactas) sendo que as lâmpadas mais eficientes neste caso são as lâmpadas fluorescentes. Nesta categoria podemos distinguir entre lâmpadas fluorescentes tubulares (vulgarmente designadas por lâmpadas T8 ou T5) e as lâmpadas fluorescentes compactas (também designadas de economizadoras).

A iluminação com recurso a estes tipos de lâmpadas apresenta maior utilização quando não há luz natural (horário nocturno) estando dependente de condições atmosféricas e variando com as estações do ano. Da análise da figura 3.3 pode-se considerar que entre as 19h e as 24h está o maior consumo relacionado com a iluminação.

3.1.3. Equipamentos audiovisuais e informáticos

Nos gráficos seguintes está representado o consumo de equipamentos audiovisuais (televisões, equipamentos de som, etc.) e informáticos. Nestes equipamentos o consumo no modo *Stand-by* é de ter em conta principalmente no horário de vazio onde apesar de desligado o equipamento continua a consumir energia.

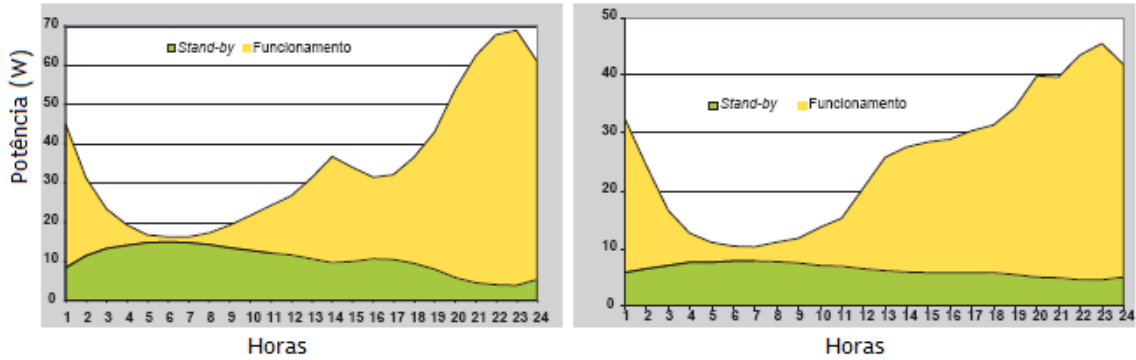


Figura 3.5 - Diagramas de carga médios de equipamentos audiovisuais e informáticos respectivamente [48].

3.1.4. Máquinas de lavar e secar roupa

A máquina de lavar roupa é um equipamento cujo consumo representa cerca de 5% do consumo total de electricidade nas habitações, apresentando uma taxa de penetração de aproximadamente 100%. O aquecimento eléctrico da água constitui por si só 80 a 90% do consumo total de energia de um ciclo de lavagem.

As máquinas de secar roupa apresentam uma taxa de penetração mais baixa (10%) nos alojamentos portugueses, mas com tendência para aumentar. Tal como no caso das máquinas de lavar roupa, a maior parte da energia é consumida no processo de aquecimento, neste caso do ar, através de resistência eléctrica.

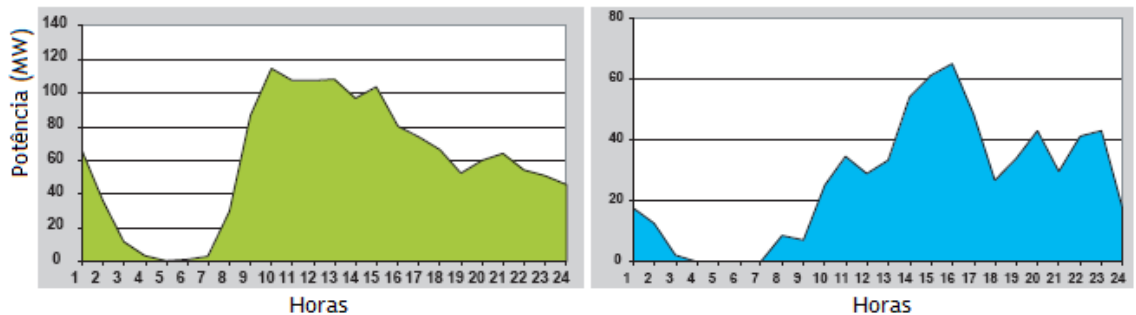


Figura 3.6 - Diagramas de carga médios da máquina de lavar roupa e secar roupa respectivamente [48].

3.1.5. Máquinas de lavar louça

A máquina de lavar louça tem apresentado, nos últimos anos, um crescimento acelerado na sua taxa de penetração no mercado, existindo actualmente em cerca de 50% das habitações. Este equipamento consome água e energia eléctrica. A electricidade é principalmente consumida pela resistência eléctrica no processo de aquecimento da água.

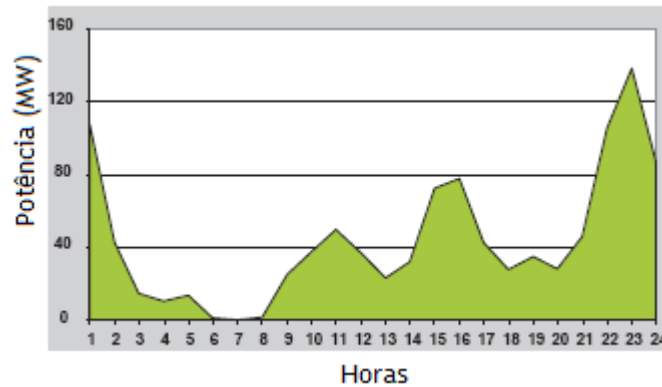


Figura 3.7 - Diagrama de carga médio da máquina de lavar louça [48].

3.1.6. Forno eléctrico

Os fornos eléctricos apresentam consumos eléctricos distintos em função dos diversos processos utilizados na confecção de alimentos. O modo de operação mais usual reside na radiação de calor por intermédio de resistências eléctricas, complementado pela acção de um ventilador que permite a circulação do calor gerado, distribuindo-o de uma forma uniforme sobre os alimentos. Existe ainda a opção de grelhador, entre outras funcionalidades, que no seu conjunto correspondem a potências eléctricas elevadas e consequentemente a consumos também elevados.

3.2. Nova Abordagem para a Modelização da Carga

Tendo por base a análise normalmente considerada em estudos de trânsitos de potência foi desenvolvido um novo modelo matemático de representação da carga. Neste modelo a potência é representada, não só em função da tensão, mas também em função da impedância característica da própria carga modelizada.

A representação da carga desempenha um papel de extrema importância em estudos do comportamento do sistema eléctrico, quer estáticos quer dinâmicos. Estes estudos de comportamento da carga visam proporcionar uma melhoria na qualidade da energia fornecida: optimizando os fluxos de potência, reduzindo as perdas, fazendo a alocação óptima da compensação de reactiva e permitindo a elaboração de esquemas de reconfiguração operacional da rede em caso de defeito.

A metodologia proposta utiliza um conjunto de dados obtidos a partir da medição directa das características das cargas individuais presentes no sistema em estudo.

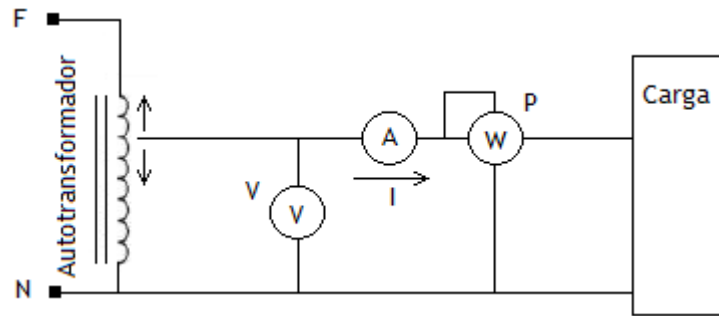


Figura 3.8 - Esquema de montagem para medição das características da carga.

O autotransformador permite variar a tensão que é aplicada à carga, alterando assim as suas condições de funcionamento.

Com os valores medidos de tensão, corrente e potência activa procede-se à análise deste conjunto de valores visando estimar os parâmetros do modelo de carga desejado. Os parâmetros obtidos para um determinado equipamento do sistema apenas podem ser utilizados em equipamentos semelhantes. Cada sistema requer o levantamento dos parâmetros da sua própria carga uma vez que esta varia entre diferentes sistemas.

De seguida será detalhado o processo de estimação dos parâmetros do modelo de carga considerado, sendo que a modelização da carga é feita de forma desacoplada entre as suas partes activa e reactiva. Na figura 3.9 é representado o circuito equivalente de *Thevenin* de um sistema eléctrico até ao ponto em estudo possuindo tensão “V” e uma carga estática ligada nesse ponto.

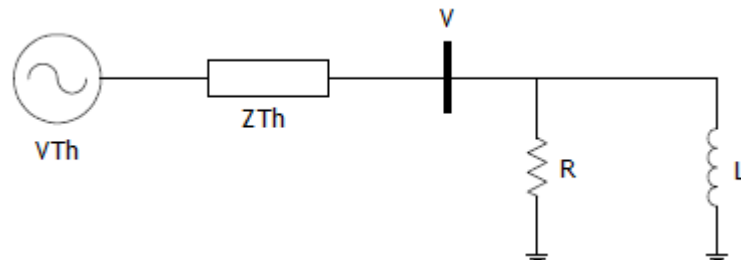


Figura 3.9 - Circuito equivalente de um sistema eléctrico comum.

Um modelo de carga é uma expressão que relaciona a potência (activa ou reactiva) consumida pela carga com as restantes variáveis, utilizando os parâmetros considerados para esse mesmo modelo.

Como se trata de estudos estáticos, as variações da frequência são mínimas e os modelos resumem-se a funções dependentes apenas do valor eficaz da tensão. Na realização destes estudos os modelos polinomial (ZIP) e exponencial são os mais amplamente usados. A formulação destes modelos encontra-se descrita no capítulo Estado da Arte. Estes modelos representam a potência unicamente dependente da tensão.

No modelo de cargas criado a potência está dependente não só da tensão, mas também dos valores de resistência e reactância da carga. Valores que são obtidos por regressão. Com estes valores de impedância, mais facilmente se consegue fazer a agregação das cargas (paralelos entre cargas). Os parâmetros do modelo criado podem ser também utilizados em estudos de trânsito de potência.

3.2.1. Descrição do novo modelo

Esta análise foi realizada de forma a obter o novo modelo, um modelo resultante da análise normalmente considerada em estudos de trânsitos de potência. Neste modelo, ao contrário dos modelos de carga vistos anteriormente (Estado da Arte), os parâmetros têm uma representação física, nele estão representadas a resistência e a reactância da carga em análise.

$$\begin{cases} S = P + jQ \\ S = \underline{V} \cdot \underline{I}^* \\ Z = R + jX \end{cases} \quad (3.1)$$

As relações entre as grandezas são estabelecidas com base nas leis de Ohm e de Kirchhoff. Sendo I a corrente absorvida pela carga, S a potência complexa, P potência activa e Q potência reactiva, a impedância Z é decomposta na sua componente resistiva (R) e reactiva (X).

$$S = \underline{V} \cdot \underline{I}^* = \underline{V} \left(\frac{\underline{V}}{\underline{Z}} \right)^* = \frac{|V|^2}{(R+jX)^*} = |V|^2 \cdot \frac{R-jX}{R^2+X^2} = \underbrace{\frac{V^2}{R^2+X^2} \cdot R}_P - j \underbrace{\frac{V^2}{R^2+X^2} \cdot X}_Q \quad (3.2)$$

Da expressão anterior é possível obter o novo modelo:

$$P = \frac{V^2}{R^2+X^2} \cdot R \quad (3.3)$$

$$Q = \frac{V^2}{R^2+X^2} \cdot X \quad (3.4)$$

Os valores de resistência (R) e reactância (X) são representados em função da tensão, sendo obtidos por regressão.

$$R = g(V) \quad (3.5)$$

$$X = h(V) \quad (3.6)$$

Com os dados obtidos das medições efectuadas é feito o cálculo dos valores de resistência (R) e da reactância (X) característicos da carga. Ao alterar o valor da tensão na entrada é possível verificar assim a evolução de R e X. O valor da reactância pode ter sinal positivo, no caso em que a carga é indutiva, ou negativo quando a carga é capacitiva.

Os coeficientes dos modelos polinomial e exponencial vistos nas tabelas 2.3 e 2.4 do capítulo Estado da Arte podem ser convertidos para este modelo, calculando os valores de R e X. Dada a impossibilidade de medição de todos os tipos de carga presentes no sector doméstico é importante poder recorrer a valores de estudos anteriores, para assim criar cenários de consumo próximos dos valores de consumo reais.

A partir da modelização da carga (expressões 3.3 e 3.4) é possível representar as curvas características dos equipamentos e assim estimar a redução de potência absorvida para cada hora do dia.

3.2.2. Conversão de parâmetros entre modelos

Utilizando os dados de medição da variação da potência em função da tensão é possível calcular os parâmetros do modelo indicado anteriormente. Desta forma é feita também a conversão dos parâmetros dos modelos polinomial e exponencial vistos anteriormente.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.7)$$

$$\lambda = \frac{P}{S} \quad (3.8)$$

O factor de potência (λ) representa a relação existente entre a potência activa (P) e a potência aparente (S). Um factor de potência próximo de 1 indica que quase toda a energia é activa, podendo ser convertida em trabalho de acordo com o rendimento do processo ou equipamento.

$$Z = \frac{V^2}{S} \quad (3.9)$$

$$\begin{cases} R = Z \cdot \lambda \\ X = Z \cdot \sqrt{(1 - \lambda^2)} \end{cases} \quad (3.10)$$

Com este modelo representa-se a energia consumida pela carga com a variação não só da tensão mas também das componentes da impedância.

A variação das componentes da impedância da carga com a tensão pode ser aproximada por uma expressão polinomial de segunda ordem, resultando dessa forma as expressões seguintes para o modelo:

$$P = \frac{V^2 \cdot (R_a \cdot V^2 + R_b \cdot V + R_c)}{(R_a \cdot V^2 + R_b \cdot V + R_c)^2 + (X_a \cdot V^2 + X_b \cdot V + X_c)^2} \quad (3.11)$$

$$Q = \frac{V^2 \cdot (X_a \cdot V^2 + X_b \cdot V + X_c)}{(R_a \cdot V^2 + R_b \cdot V + R_c)^2 + (X_a \cdot V^2 + X_b \cdot V + X_c)^2} \quad (3.12)$$

3.2.3. Agregação de cargas

Com os estudos de agregação de carga pretende-se obter uma carga equivalente vista do ponto em análise, o objectivo é representar o comportamento agregado de todas as suas cargas individuais constituintes.

Um exemplo de agregação de carga pode ser visto como a combinação desta em classes, em muitos estudos é feita a distinção entre cargas industriais, comerciais e residenciais. Desta forma são agrupados tipos de carga com características semelhantes melhorando a sua representação no modelo de estudo.

No âmbito desta dissertação a agregação de cargas é usada para representar o consumo em habitações e, a partir das suas características tirar conclusões acerca do potencial de redução de energia consumida com a regulação da tensão.

A redução de consumo está dependente do tipo de cargas presentes na habitação e da percentagem de consumo que cada uma delas representa no total.

A potência consumida por uma habitação pode ser calculada como o somatório de todas as potências dos equipamentos eléctricos que nela se inserem. Esta potência é afectada por um factor de simultaneidade, uma vez que as cargas normalmente não estão ligadas todas ao mesmo tempo. A potência de consumo para um determinado instante está assim dependente dos equipamentos que estão em funcionamento nesse instante.

$$S_{eq} = S_1 + S_2 + \dots + S_n \quad (3.13)$$

Com a medição da tensão e da corrente é possível determinar a impedância da carga equivalente.

$$\left. \begin{array}{l} I = \frac{V}{Z} \Leftrightarrow Z = \frac{V}{I} \\ S = V \cdot I \Leftrightarrow I = \frac{S}{V} \end{array} \right\} Z = \frac{V}{\frac{S}{V}} = \frac{V^2}{S} \quad (3.14)$$

Com a impedância (Z) e o factor de potência calcula-se os restantes parâmetros da carga (resistência e reactância). O factor de potência pode ser calculado dividindo a potência activa (P) pela potência aparente (S) como visto anteriormente.

Paralelo entre cargas

Grande parte dos equipamentos eléctricos de uma habitação são monofásicos estando ligados entre fase e neutro, desta forma ao serem ligadas várias cargas estas ficam em paralelo. Idealmente (sem considerar perdas) todas estas cargas estão ligadas à mesma tensão de 230 V (valor RMS).

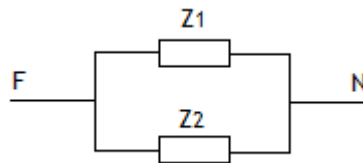


Figura 3.10 - Impedâncias em paralelo.

As impedâncias representadas podem ser compostas de diferentes formas por resistência e por reactância (indutância ou capacitância). O mais comum é ter cargas resistivas e indutivas, pela razão de existirem motores na maioria das cargas introduzindo assim a componente indutiva. De forma simplificada a impedância das cargas pode ser aproximada pela série da componente resistiva com a componente reactiva.

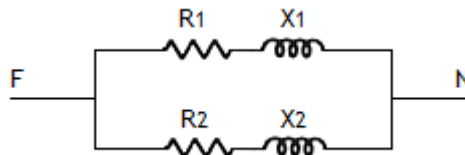


Figura 3.11 - Impedâncias em paralelo.

A impedância equivalente pode ser calculada recorrendo as seguintes fórmulas:

$$Z_p = \frac{|Z_1| \cdot |Z_2|}{|Z_1 + Z_2|} \quad (3.15)$$

$$|Z_1| = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} \quad (3.16)$$

$$|Z_2| = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} \quad (3.17)$$

$$|Z_1 + Z_2| = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2} \quad (3.18)$$

Em que:

Z_p indica a impedância do paralelo;

Z_1 e Z_2 correspondem as impedâncias de cada uma das cargas;

R_1 e R_2 parte resistiva das cargas;

X_1 e X_2 parte reactiva das cargas.

3.3. Estimativa da Poupança

A poupança possível de alcançar está dependente da redução de consumo dos equipamentos presentes nas habitações e por isso também das suas curvas de variação de potência função da tensão. Um aspecto já falado anteriormente está relacionado com o horário de funcionamento de cada um destes equipamentos, visto que a tensão de alimentação da rede a que estão ligados não tem um valor constante durante o dia. Para tentar representar o maior número de consumidores foram utilizadas distribuições de consumo semelhantes às vistas anteriormente, para os vários tipos de equipamentos.

O estudo da variação da tensão ao longo do dia foi feito com base em valores medidos em diferentes pontos geográficos, valores esses que foram fornecidos pela empresa Smartwatt. Com esses valores foi possível traçar um perfil de tensão diário calculando o valor médio, mínimo e máximo para intervalos de meia hora em cada uma das zonas estudadas (Porto, Estarreja e Ponte da Barca). Com a análise dos valores de tensão foi também possível verificar as diferenças no perfil diário entre dias da semana e fins-de-semana. Utilizando os valores de tensão em dias da semana e fins-de-semana e as percentagens de redução da potência consumida por cada equipamento (com tensão de entrada de 1 p.u. = 230V, 0.96 p.u. ≈ 221V e 0.92 p.u. ≈ 212V) é calculada a redução de consumo da habitação para os intervalos considerados.

A percentagem de consumo ($\%C_x$) do equipamento x em relação ao consumo total no intervalo considerado (meia hora) pode ser calculada pela expressão:

$$\%C_x = \frac{C_x \cdot \%U_x}{\sum C_T} \quad (3.19)$$

Em que:

C_x representa o consumo (potência) do equipamento x ;

$\%U_x$ indica a percentagem de utilização do equipamento x nesse intervalo (meia hora) em relação ao total de equipamentos da habitação;

$\sum C_T$ representa o consumo total de habitação nesse intervalo (meia hora).

Com a expressão (3.19) pretende-se saber como é a carga (variação da potência com a tensão) no intervalo considerado. A característica da carga total da habitação, ao estar dependente dos equipamentos em funcionamento, vai variar ao longo do dia.

Ao regular o valor de tensão aplicada para um valor definido o consumo total da habitação (C_T) vai ser alterado:

$$C_T = \sum(\%C_x \cdot R_x) \quad (3.20)$$

Onde:

$\%C_x$ representa o peso do consumo do equipamento x no intervalo;

R_x indica a redução de consumo desse equipamento (curva característica de potência função da tensão).

Com o somatório de todos os valores obtidos para cada intervalo é possível traçar o novo diagrama de cargas diário da habitação agora com a tensão de alimentação regulada. O valor da redução de consumo pode ser calculado subtraindo à potência verificada antes da regulação, a potência consumida com o valor de tensão definido.

$$R_{C_T} = P_{C_{TR}} - P_{C_{TD}} \quad (3.21)$$

Sendo:

R_{C_T} o valor de redução total no consumo (potência absorvida);

$P_{C_{TR}}$ a potência absorvida com a tensão da rede;

$P_{C_{TD}}$ a potência absorvida com o nível de tensão regulado para o valor definido.

A economia alcançada com a utilização de uma tensão de alimentação regulada pode ser calculada com base na redução de consumo obtida e com as tarifas aplicadas à habitação em estudo. Neste cálculo não é tido em conta o eventual aumento do tempo de funcionamento quando existem dispositivos termostáticos ou quando o próprio utilizador faz o ajuste aumentando a potência do equipamento.

A tarifa de baixa tensão normal (BTN) é a tarifa de fornecimento de energia em baixa tensão da generalidade dos clientes residenciais com potência contratada inferior a 20.7 kVA. Esta tarifa é composta por duas componentes, uma referente à parcela fixa de acordo com a potência contratada (€/dia) e a outra função do consumo verificado (€/kWh). A poupança com a regulação da tensão é obtida na redução da componente dependente do consumo.

Tabela 3.1 - Tarifas de baixa tensão normal até 20.7 kVA [49].

Encargos de potência	kVA	EUR/mês	EUR/dia*
Simples	1,15	2,20	0,0725
	2,3	3,87	0,1273
Simples, bi-horária e tri-horária	3,45	5,51	0,1813
	4,6	7,16	0,2353
	5,75	8,80	0,2893
	6,9	10,44	0,3434
	10,35	15,37	0,5054
	13,8	20,30	0,6675
	17,25	25,23	0,8295
	20,7	30,16	0,9916

Preço da energia activa	Período horário	EUR/kWh
Simples \leq 2,3kVA		0,1027
Simples > 2,3 kVA		0,1326
Bi-horária	Horas fora de vazio	0,1448
	Horas de vazio	0,0778
Tri-horária	Horas de ponta	0,1593
	Horas de cheias	0,1373
	Horas de vazio	0,0778

Nos casos em que se opta por tarifas bi-horárias e tri-horárias o preço da energia é dividido nos períodos de maior e menor consumo (horas de ponta e cheia, e horas de vazio) sendo o preço mais baixo no horário de menor consumo. Desta forma pretende-se incentivar o consumo nesse horário contribuindo para a regulação do diagrama de cargas.

Capítulo 4

Procedimento e Estudo Experimental

Neste capítulo serão apresentados os resultados das medições efectuadas para os diferentes tipos de carga, estas medições visam verificar a redução de potência provocada pelo abaixamento da tensão. Numa primeira fase foram feitos testes com cargas presentes no laboratório, sendo estas cargas aproximadas a cargas ideais resistivas, indutivas e capacitivas. Foram depois feitos testes com alguns equipamentos domésticos normalmente presentes em habitações residenciais.

Depois de caracterizadas as cargas foram criados cenários de consumo, estes cenários com a agregação das cargas, representam o consumo característico de habitações do sector residencial. Finalmente para estimar o valor de poupança alcançável foi necessário estudar o comportamento da tensão na rede de distribuição no ponto em estudo.

4.1. Variação do Consumo (Potência) função da Tensão

A tensão que é aplicada à carga pode ser variada com o auxílio de um autotransformador, nas medidas efectuadas no laboratório foi utilizado um autotransformador trifásico (400V, 13 A, 10.14 kVA) sendo usada apenas uma das fases. A aparelhagem de medida utilizada na realização dos ensaios encontra-se descrita em anexo. Na medição da potência em função da tensão em equipamentos domésticos utilizou-se um autotransformador monofásico pela sua menor dimensão e peso, as suas características são semelhantes ao autotransformador trifásico quando é usada apenas uma das fases.

4.1.1. Testes com cargas de laboratório

Carga Resistiva

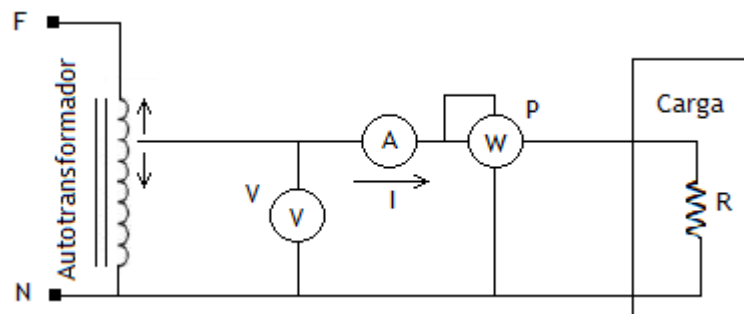


Figura 4.1 - Esquema de montagem, carga resistiva.

Com o autotransformador foi feita a variação de tensão entre 0,8 e 1,2 p.u.. Para cada valor de tensão neste intervalo foi medida também a corrente e a potência activa como presente na figura 4.1. Com estes valores medidos foi possível caracterizar o comportamento da carga.

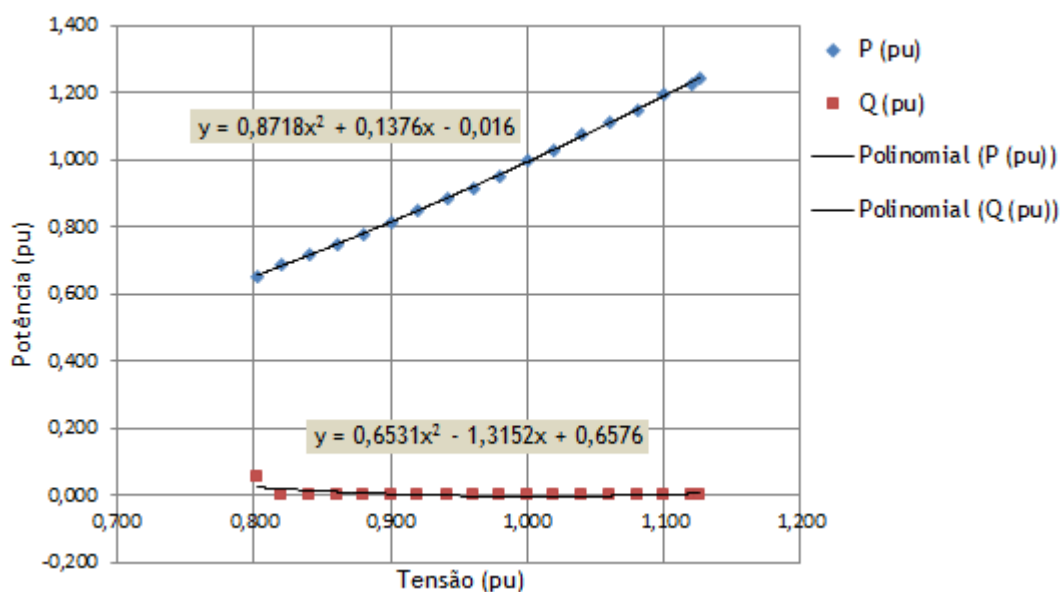


Figura 4.2 - Potência Activa (P) e Reactiva (Q) função da tensão para a carga resistiva.

Pela expressão da função de aproximação aos valores medidos é possível verificar que a potência activa diminui de forma aproximadamente quadrática, como era de esperar com a redução da tensão aplicada. Como se trata de uma carga resistiva a potência reactiva é aproximadamente zero.

Ao baixar a tensão de 1 para 0,9 p.u. (23V) é provocada uma redução de 18,5% da potência activa consumida pela carga. Este tipo de cargas apresenta uma elevada

componente de impedância constante (termo que varia com a tensão ao quadrado) na expressão da potência activa.

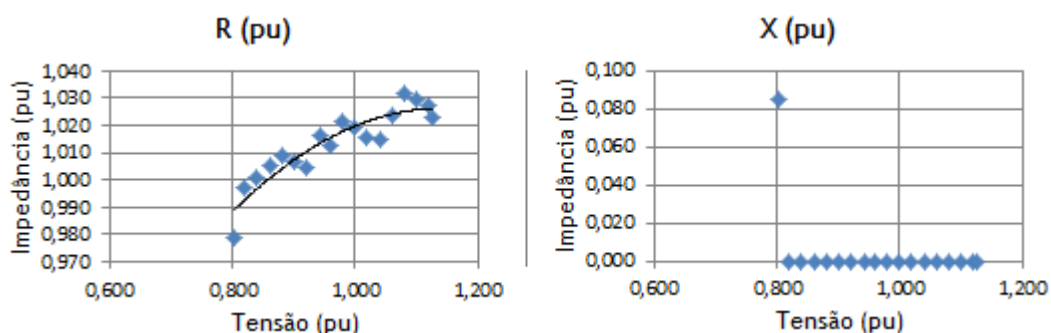


Figura 4.3 - Variação da resistência e reactância na carga resistiva.

A variação da resistência verificada indica que não se trata de uma resistência ideal pois seria de esperar uma resistência constante independentemente da variação da tensão.

Para os valores mais baixos da tensão, os resultados não serão fiáveis devido ao erro relativo dos aparelhos de medição. A variação da resistência está dependente da variação da temperatura, como o ensaio foi feito para valores crescentes de tensão a temperatura vai aumentar o que provoca a elevação da resistência.

Carga Indutiva

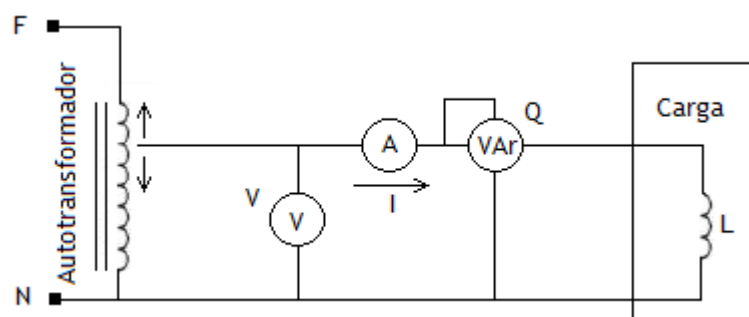


Figura 4.4 - Esquema de montagem, carga indutiva

No caso em que a carga é indutiva haverá consumo de energia reactiva. Uma grande parte dos equipamentos eléctricos apresenta componente indutiva.

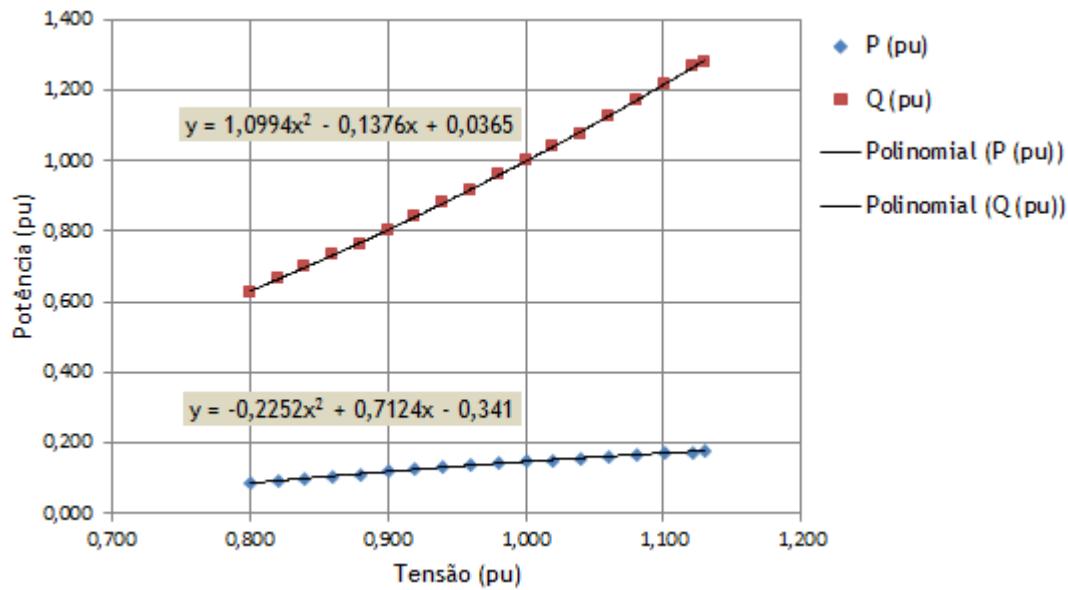


Figura 4.5 - Potência Activa (P) e Reactiva (Q) função da tensão para a carga indutiva.

No caso da carga indutiva constata-se que esta também não é ideal, apresenta uma parte resistiva associada ainda que esta represente uma pequena parte da carga. Como anteriormente verifica-se uma redução da potência, neste caso essa redução é mais pronunciada na potência reactiva. Ao baixar a tensão de 1 para 0,9 p.u. é provocada uma redução de 17,3% na potência activa e 19,8% na potência reactiva.

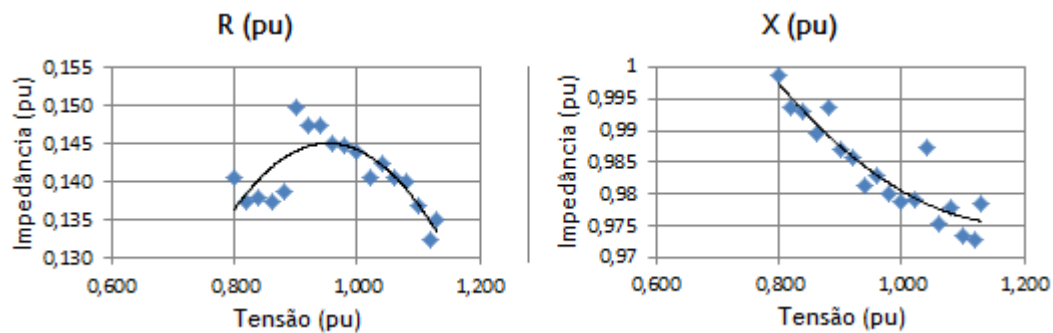


Figura 4.6 - Variação da resistência e reactância na carga indutiva.

No gráfico da figura anterior é evidente a saturação do núcleo de ferro para valores de tensão elevados.

Carga Capacitiva

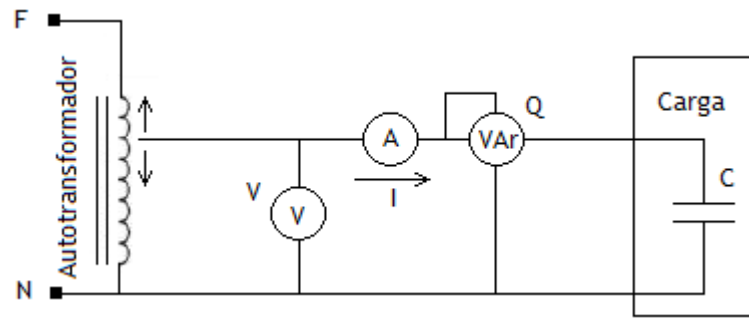


Figura 4.7 - Esquema de montagem, carga capacitiva.

Em muitos casos, principalmente na média tensão, são utilizadas baterias de condensadores para fornecer energia reactiva à rede como forma de compensar a energia reactiva consumida por alguns dos equipamentos. Não sendo uma situação vulgar em instalações domésticas julgou-se conveniente ensaiar também este tipo de carga.

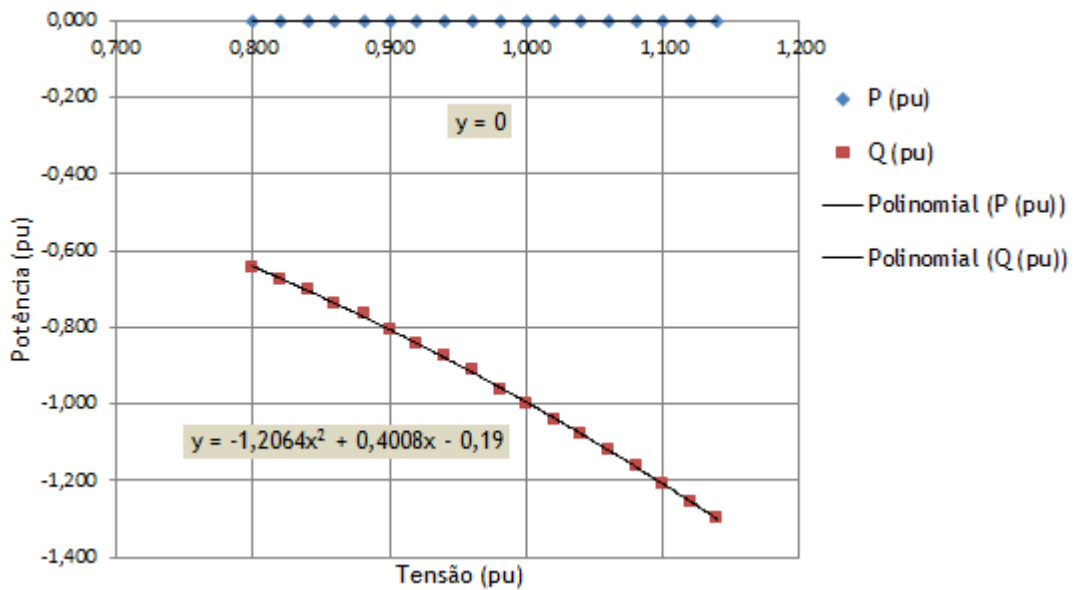


Figura 4.8 - Potência Activa (P) e Reactiva (Q) função da tensão para a carga capacitiva.

Uma carga capacitiva injecta potência reactiva na rede, ao reduzir a tensão à qual é alimentada reduz-se essa potência, neste caso a redução verificada foi de 19,4% ao passar de 1 para 0,9 p.u..

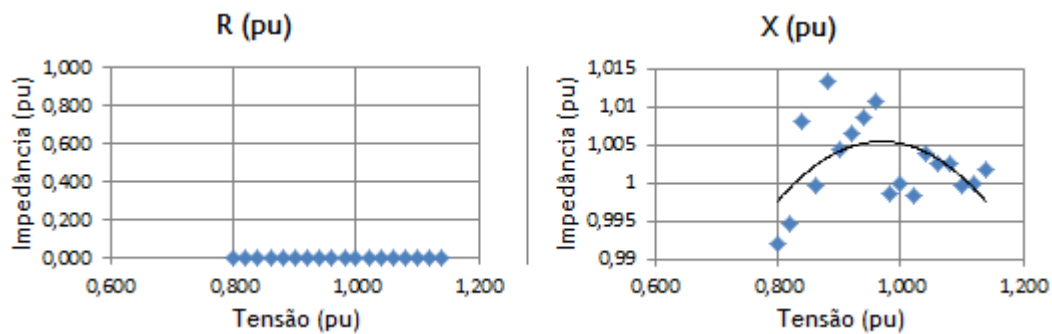


Figura 4.9 - Variação da resistência e reactância na carga capacitiva.

Carga Resistiva e Capacitiva

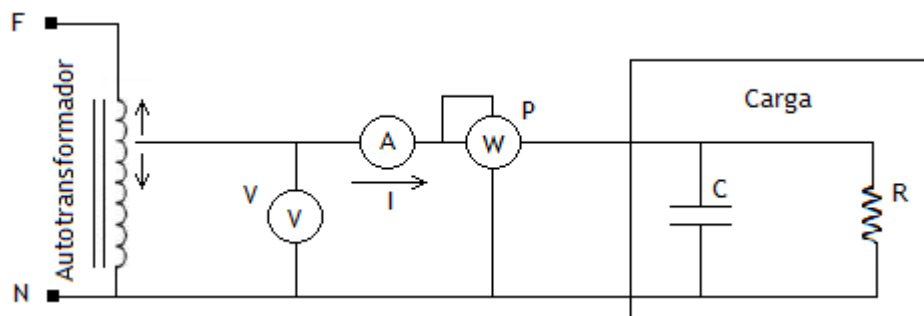


Figura 4.10 - Esquema de montagem, carga resistiva e capacitiva.

As cargas foram ligadas em paralelo (1000 W de carga resistiva e 1200 VAr de carga capacitiva), desta forma as duas componentes da carga ficam sujeitas á mesma variação de tensão.

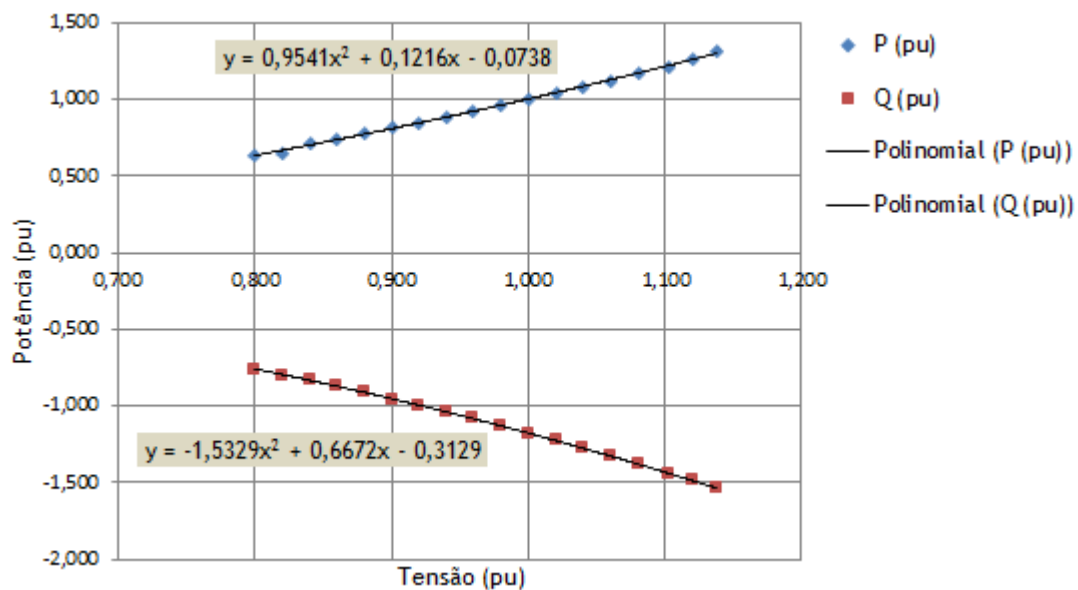


Figura 4.11 - Potência Activa (P) e Reactiva (Q) função da tensão para a carga resistiva e capacitiva.

Ao reduzir a tensão como anteriormente é possível reduzir em 18,7% a potência activa e 19,2% a potência reactiva.

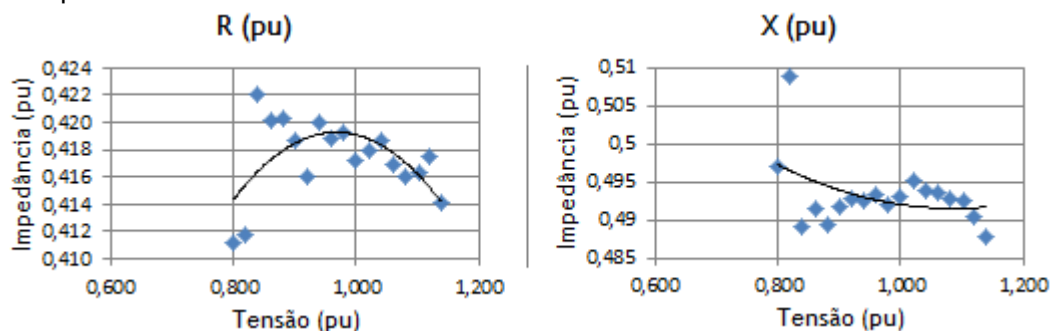


Figura 4.12 - Variação da resistência e reactância na carga resistiva e capacitiva.

Carga Resistiva, Indutiva e Capacitiva

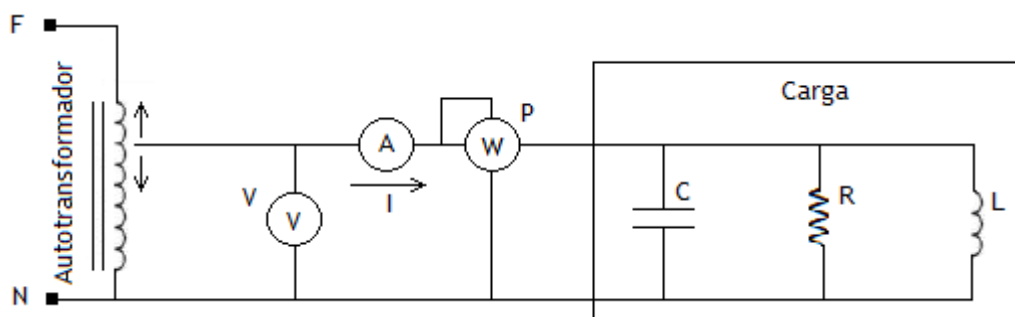


Figura 4.13 - Esquema de montagem, carga resistiva, indutiva e capacitiva.

Foi utilizada uma carga resistiva de 1400 W em paralelo com uma carga indutiva de 1500 VAR e uma carga capacitiva de 1200 VAR.

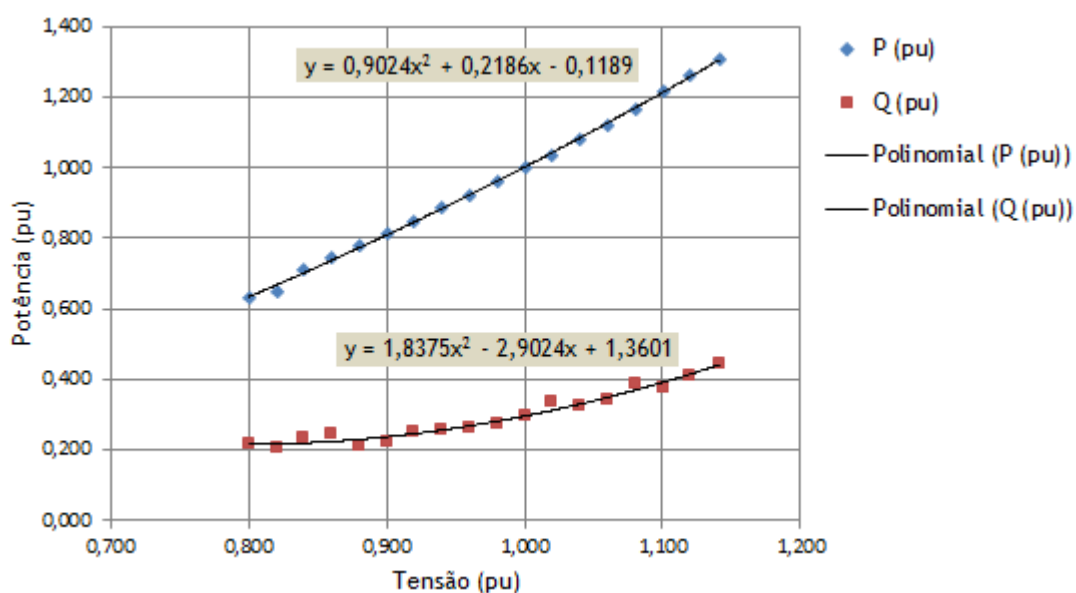


Figura 4.14 - Potência Activa (P) e Reactiva (Q) função da tensão para a carga resistiva, indutiva e capacitiva.

Como uma carga não pode ser indutiva e capacitiva ao mesmo tempo, existe uma compensação entre estes dois componentes. Nesta carga existe uma redução de 18,2% na potência activa e 25,4% na potência reactiva ao baixar a tensão de 1 para 0,9 p.u..

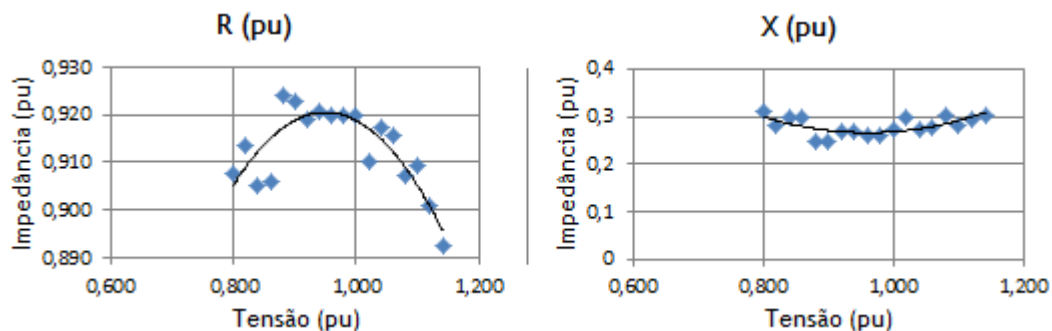


Figura 4.15 - Variação da resistência e reactância na carga resistiva, indutiva e capacitiva.

4.1.2. Testes com equipamentos domésticos

Foram realizados ensaios com equipamentos normalmente presentes em habitações do sector residencial como equipamentos de ventilação, computadores, frigorífico e microondas.

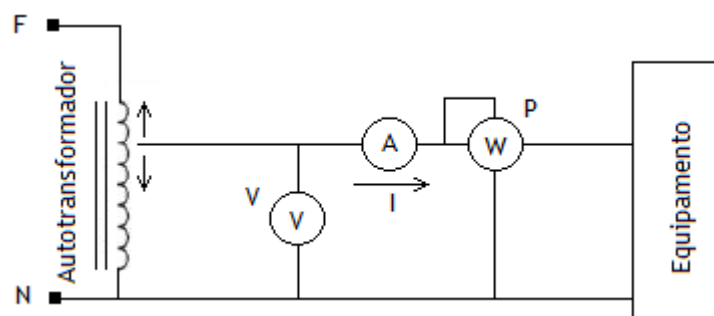


Figura 4.16 - Esquema de montagem, equipamento doméstico.

Neste caso a variação de tensão foi feita com cuidados adicionais de forma a não danificar os equipamentos em teste, a variação da tensão em alguns casos foi feita apenas entre os valores admissíveis na rede (0,9 p.u. a 1,06 p.u.).

Equipamento de Ventilação

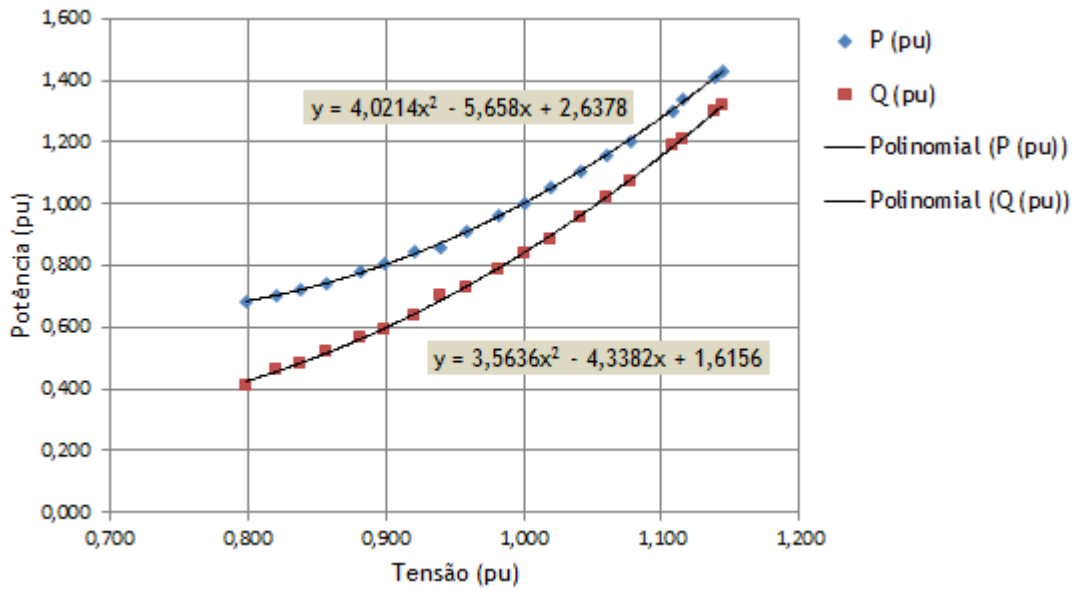


Figura 4.17 - Potência Activa (P) e Reactiva (Q) função da tensão em equipamentos de ventilação.

Redução na potência activa de 19,3% e de 29% na potência reactiva ao baixar de 1 para 0,9 p.u..

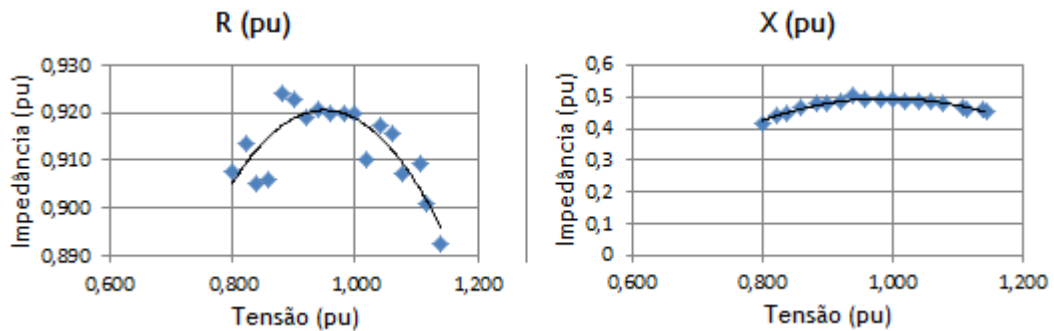


Figura 4.18 - Variação da resistência e reactância do equipamento de ventilação.

Pela análise da lei de Ohm para a impedância aumentar quando a tensão baixa é necessário que a corrente baixe de forma ainda mais acentuada. No caso em que se verifica a diminuição da impedância com a diminuição da tensão, a corrente ou diminui de forma menos acentuada que a tensão, ou se mantém num valor constante, ou então aumenta.

Conjunto de dois computadores

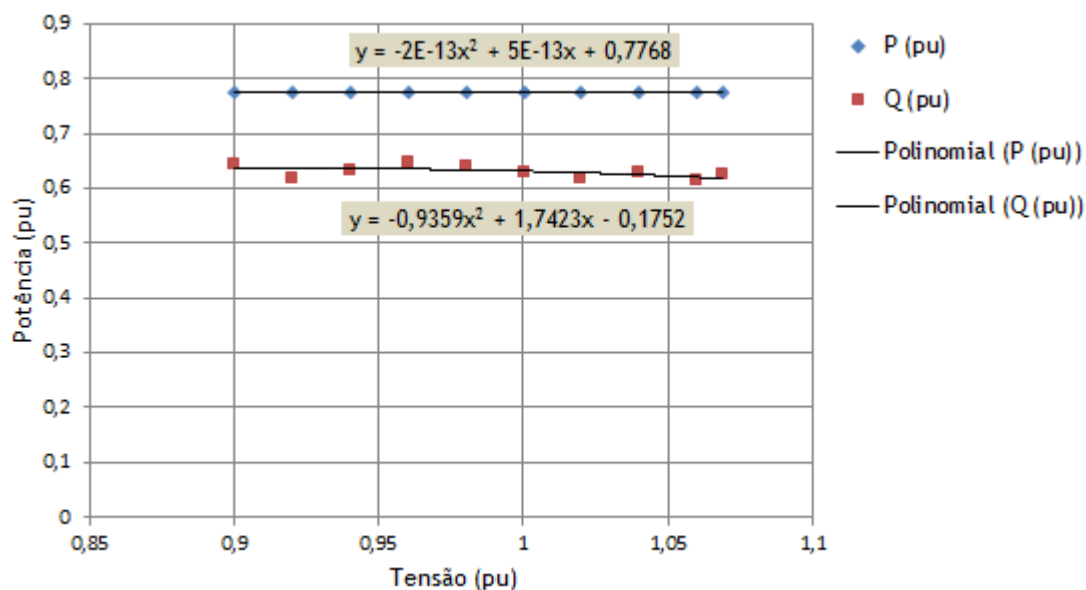


Figura 4.19 - Potência Activa (P) e Reactiva (Q) função da tensão nos computadores.

Como seria de esperar neste caso a potência permanece constante perante a variação da tensão, como se trata de um tipo de carga com fonte de alimentação controlada a sua potência não varia. A expressão polinomial apresenta um valor elevado na componente de potência constante em que não há dependência da tensão.

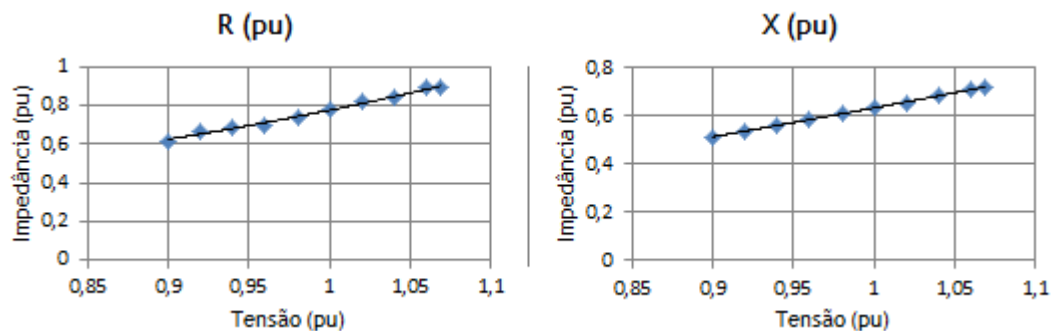


Figura 4.20 - Variação da resistência e reactância nos computadores.

Frigorífico

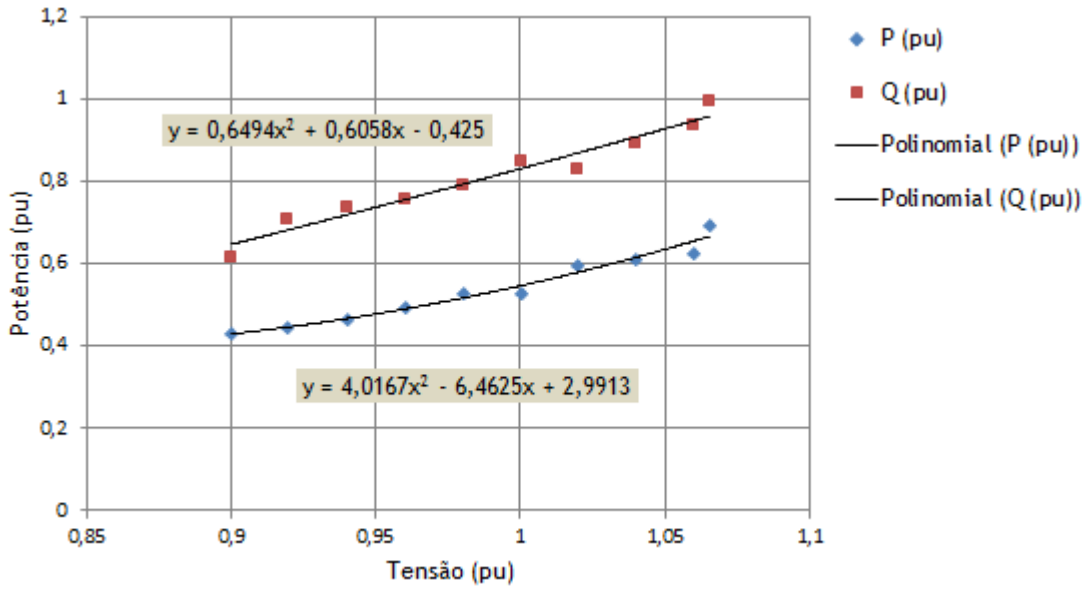


Figura 4.21 - Potência Activa (P) e Reactiva (Q) função da tensão no frigorífico.

A redução da tensão entre 1 e 0,9 p.u. leva à redução de potência de aproximadamente 18% verificando-se também redução na potência reactiva. Com a medição neste caso obteve-se um valor de redução de potência próximo do modelo visto, modelo que se encontra em anexo.

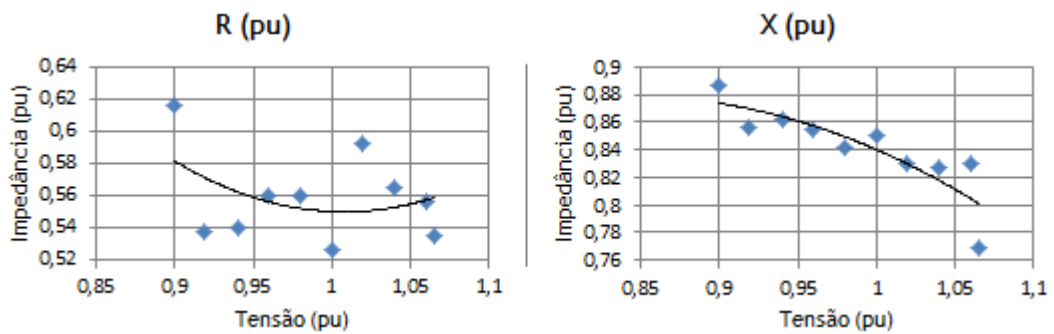


Figura 4.22 - Variação da resistência e reactância no frigorífico.

Microondas

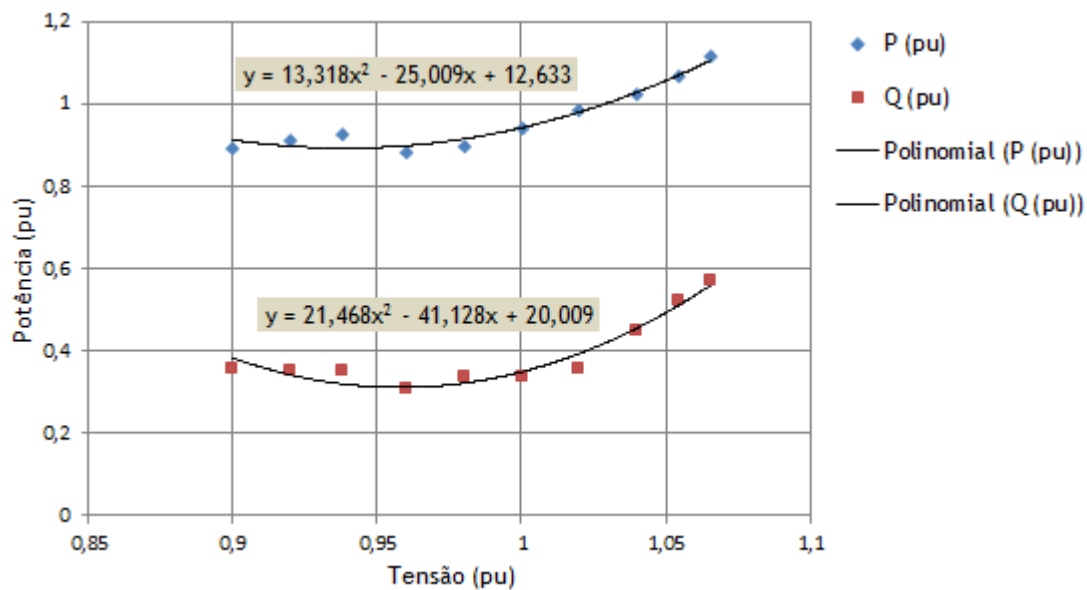


Figura 4.23 - Potência Activa (P) e Reactiva (Q) função da tensão no microondas.

Verifica-se uma redução da potência activa na ordem dos 5% ao reduzir a tensão de 1 para 0,9 p.u.. A variação da potência em função da tensão está fortemente relacionada com o equipamento no qual se fazem os ensaios e com o regime de funcionamento em que se encontra, talvez por esse motivo se verifique a diferença para os valores obtidos noutros estudos. No entanto a percentagem de redução de potência é aproximada ao valor visto para o mesmo tipo de equipamentos.

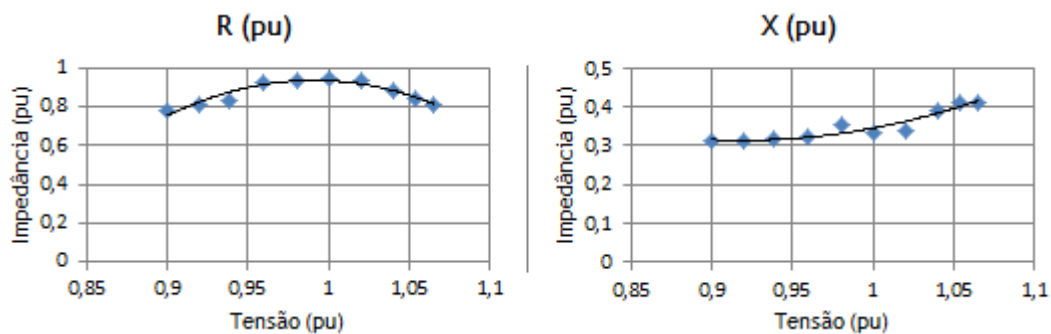


Figura 4.24 - Variação da resistência e reactância no microondas.

4.2. Comparação com Estudos Anteriores

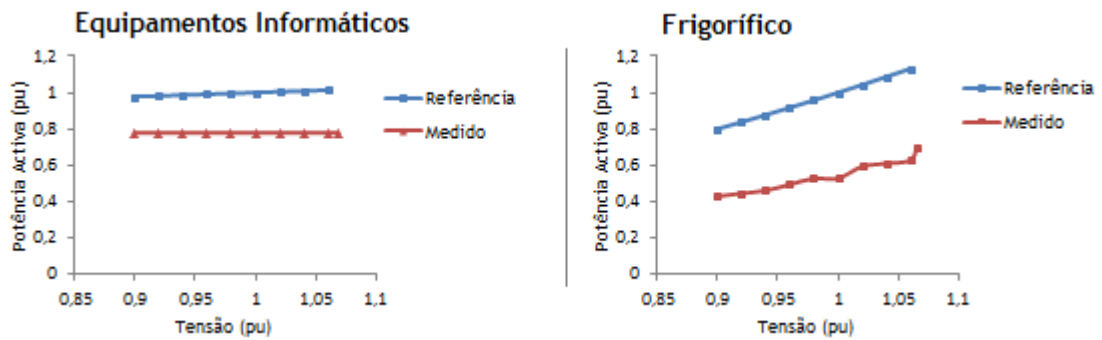


Figura 4.25 - Comparação entre os valores de referência e os valores medidos, em equipamentos informáticos e frigoríficos.

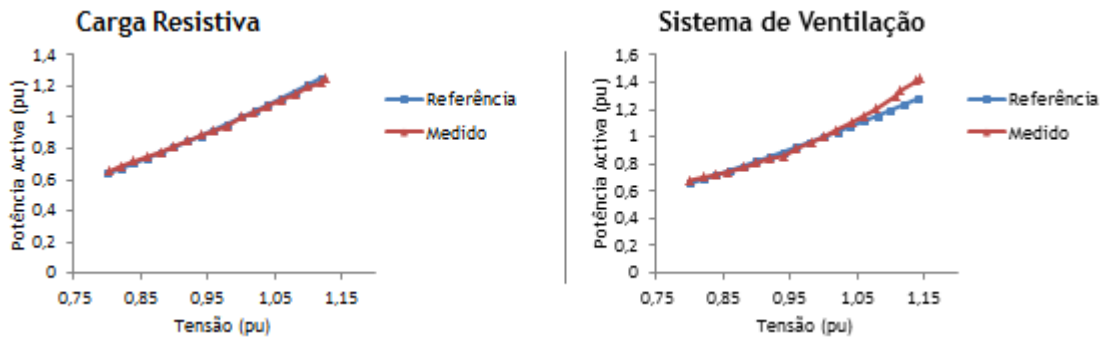


Figura 4.26 - Comparação entre os valores de referência e os valores medidos, em cargas resistivas e sistemas de ventilação.

Da comparação entre os gráficos das medições efectuadas e os valores de referência vistos anteriormente (Estado da Arte) para equipamentos equivalentes é possível concluir que a inclinação das curvas de forma geral é idêntica. Também pela correspondência verificada nos valores dos parâmetros apresentados em diferentes estudos, esses valores foram utilizados no cálculo de redução de potência absorvida.

4.2.1. Conversão de parâmetros

Foi efectuada a conversão dos parâmetros (do modelo polinomial e exponencial) no modelo criado, de acordo com a formulação referida no capítulo anterior. Os parâmetros obtidos para o novo modelo são apresentados na tabela seguinte:

Tabela 4.1 - Conversão dos parâmetros dos modelos

Equipamento	Modelo Polinomial						Novo Modelo						
	Potência Activa			Potência Reactiva			Resistência			Reactância			
	Z	I	P	Z	I	P	Ra	Rb	Rc	Xa	Xb	Xc	
Frigorífico/ congelador	1,19	-0,26	0,07	0,59	0,65	-0,24	0,04	0,00	0,46	0,01	-0,08	0,57	
Equipamento de escritório	0,08	0,07	0,85	0	0	0	0,51	0,74	-0,25	0,00	0,00	0,00	
Microondas	-2,78	6,06	-2,28	0	0	0	3,32	-5,07	2,74	0,00	0,00	0,00	
Forno eléctrico	0,99	0	0	0	0	0	0,00	0,00	1,01	0,00	0,00	0,00	
Equipamentos audiovisuais	0	0	1	0	0	0,15	0,98	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	
Lâmpadas de halogénio	0,66	0,39	0	0	0	0	-0,23	0,81	0,37	0,00	0,00	0,00	
Secador	1,02	0	0	0,1	0	0	0,00	0,00	0,97	0,00	0,00	0,10	
	Modelo Exponencial												
	α (potência activa)			β (potência reactiva)									
Lâmpadas incandescentes	1,54			0			-0,07	1,12	-0,55	-0,64	1,52	-0,38	
Lâmpadas fluorescentes compactas	0,95 - 1,03			0,31 - 0,46			0,16	0,49	-0,15	-0,10	0,69	-0,10	
Lâmpadas fluorescentes convencional	2,07			3,21			0,34	-1,28	1,44	-0,31	0,60	0,21	
Ar condicionado central	0,2			2,2			-0,92	1,77	-0,35	-0,57	2,03	-0,95	
Resistência para aquecimento ambiente	2			0			-0,44	1,85	-0,91	-0,97	1,97	-0,49	
Máquina de lavar louça	1,8			3,5			0,18	-1,09	1,41	-0,75	1,61	-0,36	
Máquina de lavar roupa	0,08			1,6			-0,63	1,46	-0,34	-0,11	1,17	-0,56	
Máquina de secar roupa	2			3,3			0,31	-1,27	1,46	-0,43	0,86	0,06	
Bomba de água para irrigação	1,4			1,4			-0,06	0,42	0,14	-0,06	0,42	0,14	
Termoacumulador	2			0			-0,44	1,85	-0,91	-0,97	1,97	-0,49	

Com a aplicação destes parâmetros nos modelos, verificam-se valores de potências aproximadamente iguais, com uma diferença sempre inferior a 1%, o que valida os parâmetros do modelo criado. A pequena diferença está relacionada com a aproximação dos valores da resistência e da reactância à expressão polinomial de segunda ordem.

4.3. Cargas Agregadas (cenários de consumo)

A carga presente no sector residencial é composta por um mix de tipos de cargas diferentes que respondem de forma distinta à variação da tensão aplicada. Para ter uma ideia do impacto da redução da tensão neste sector é necessário saber quais são os tipos de carga que nele estão presentes e qual o seu peso no consumo total.

Foram criados diferentes cenários de consumo com base na sua distribuição pelos diferentes usos no sector residencial de forma a estimar a redução que se pode obter.

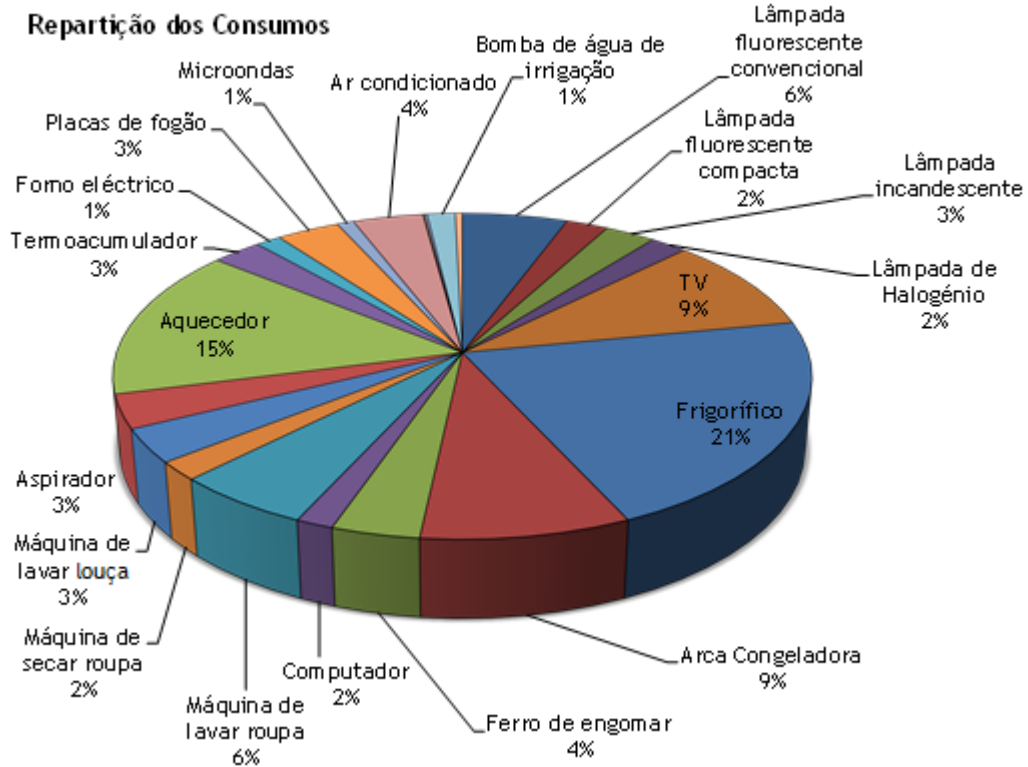


Figura 4.27 - Possível repartição do consumo no sector residencial.

No caso da composição da carga ser a indicada na figura anterior ao reduzir a tensão de 1 para 0,9 p.u. a potência é reduzida 15,6% como indica o gráfico da figura 4.28. Este valor é obtido com base nas características dos equipamentos representados. Como não foi possível medir a variação da potência em função da tensão para todos os tipos de equipamentos considerados recorreu-se a valores obtidos em estudos realizados anteriormente, estudos publicados nos artigos do IEEE [6, 7].

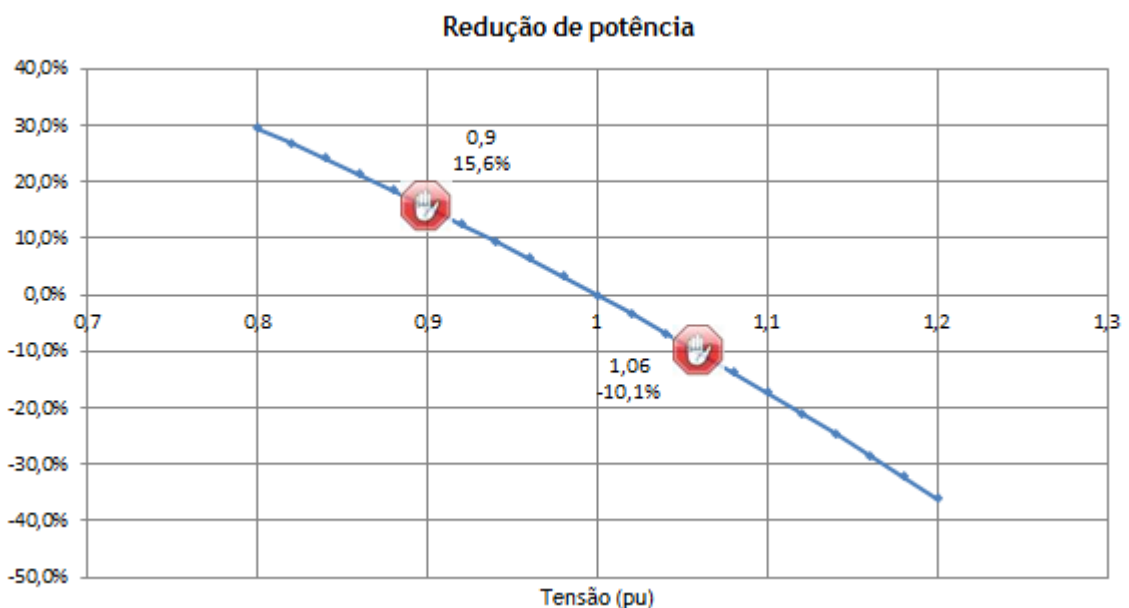


Figura 4.28 - Redução de potência para o cenário de consumo anterior.

No gráfico é representada a redução de potência activa com a variação da tensão, são também indicados os valores máximo e mínimo admitidos para a variação da tensão na rede. Verifica-se que há uma variação da potência activa de 25,7% entre o valor máximo de 1,06 p.u. (243,8V) e o valor mínimo de 0,9 p.u. (207V). Este valor de variação é obtido para os pesos (percentagens) considerados para cada equipamento, ao alterar estes valores a redução de potência também vai ser alterada. Por exemplo, ao aumentar a percentagem de equipamentos audiovisuais a redução de consumo vai ser menor uma vez que estes equipamentos requerem potência aproximadamente constante.

4.4. Perfis de Tensão da Rede

A rede de distribuição de baixa tensão constitui o sistema de fornecimento de energia à maioria dos consumidores, a 400V no caso de alimentação trifásica e a 230V no caso monofásico. Esta rede é alimentada por postos de transformação localizados nas proximidades do consumo. Dada a topologia da rede e a variação do consumo a tensão vai variar ao longo do dia. Níveis de tensão altos são mais frequentes durante o horário nocturno e fins-de-semana quando o consumo de electricidade é mínimo, sendo os níveis mais baixos nos picos de consumo (figuras 4.32, 4.33 e 4.34).

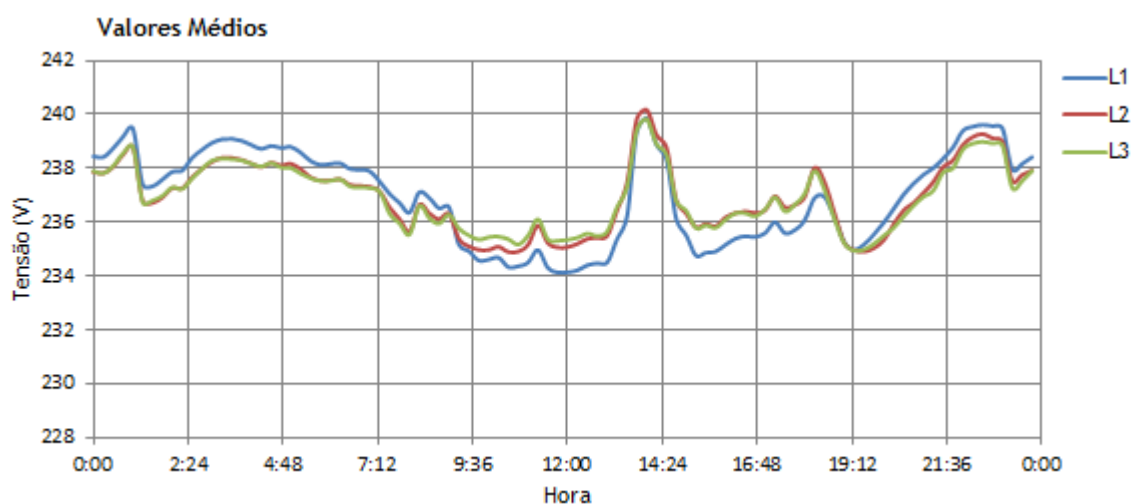


Figura 4.29 - Valores médios da tensão da rede nas três fases, zona de Estarreja

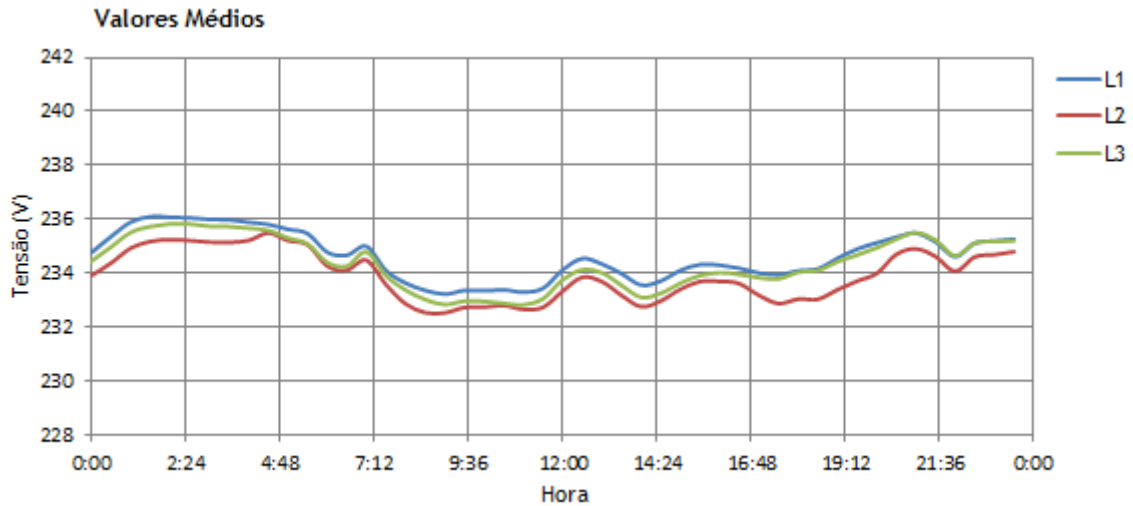


Figura 4.30 - Valores médios da tensão da rede nas três fases, zona do Porto

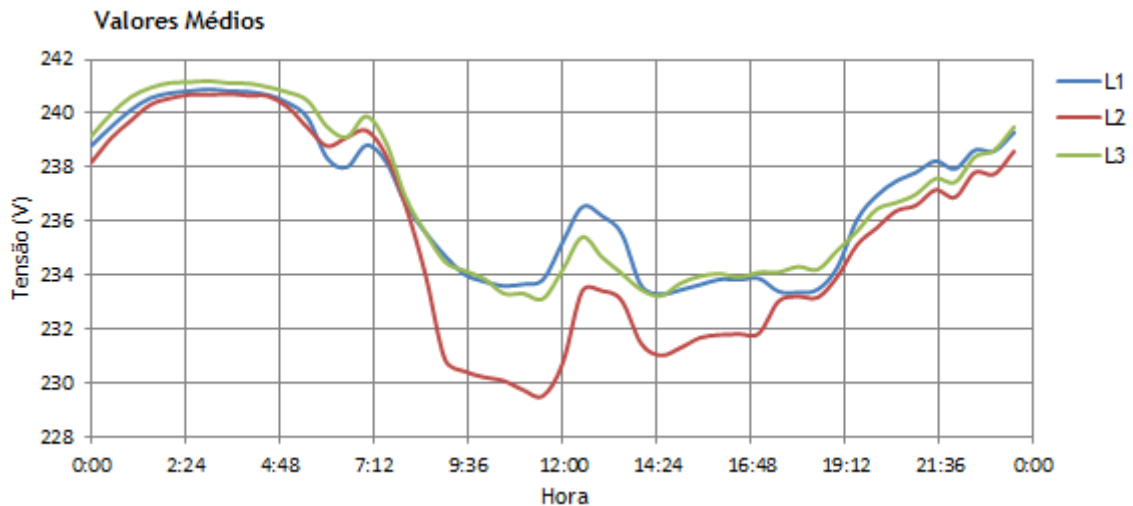


Figura 4.31 - Valores médios da tensão da rede nas três fases, zona de Ponte da Barca.

O desequilíbrio entre as fases que constituem a rede de distribuição em baixa tensão representa um problema para os equipamentos trifásicos e para a rede de distribuição, provocando perdas adicionais no sistema. Este problema é provocado pela desigual distribuição da carga pelas diferentes fases.

Existe pouco controlo sobre o consumo de electricidade, controlo relacionado com o horário de consumo e quantidade de energia requerida o que provoca variações de tensão na rede. A variação do consumo ao longo do dia tal como variação entre dias úteis e dias de fim-de-semana provocam a variação da tensão na rede.

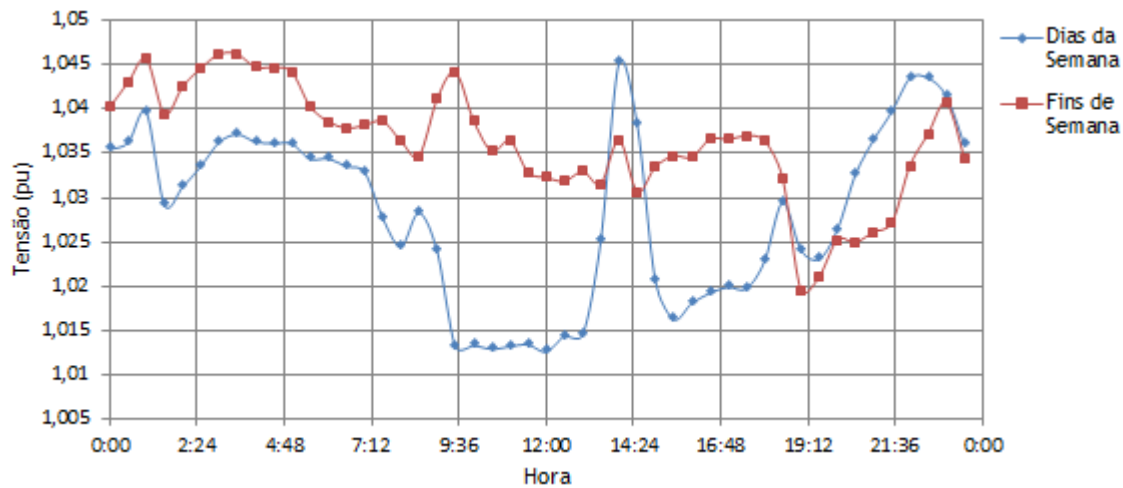


Figura 4.32 - Variação da tensão ao longo do dia para dias úteis e fins-de-semana numa das fases da zona de Estarreja.

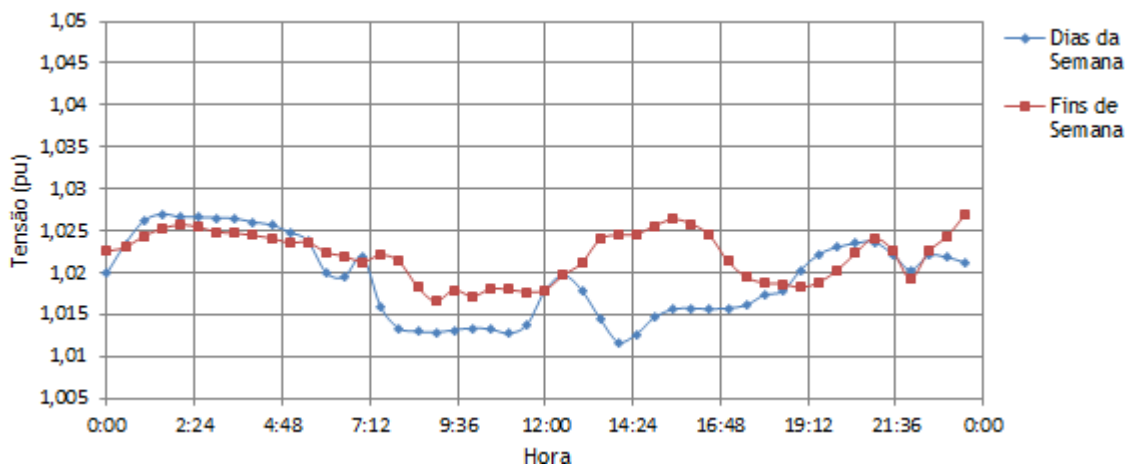


Figura 4.33 - Variação da tensão ao longo do dia para dias úteis e fins-de-semana numa das fases para a zona do Porto.

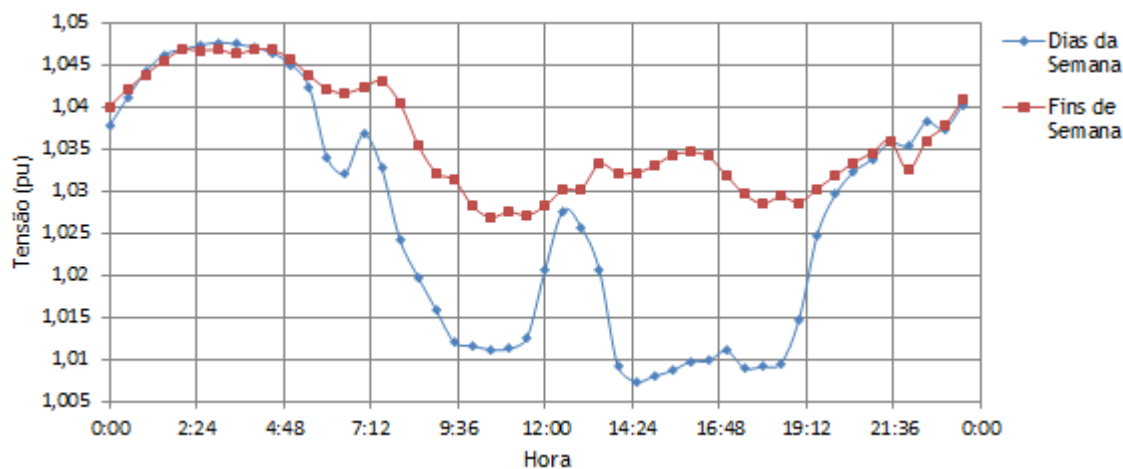


Figura 4.34 - Variação da tensão ao longo do dia para dias úteis e fins-de-semana numa das fases na zona de Ponte da Barca.

Pelos gráficos é possível verificar que em dias de fim-de-semana a tensão se mantém em valores superiores, isto resulta da menor carga aplicada (nesses dias) nos horários de ponta e cheia. Apesar de existir pouco controlo sobre o consumo é possível criar diagramas de carga característicos.

Com o aumento do uso de equipamentos electrónicos relativamente sensíveis as variações de tensão é crescente a necessidade de regulação da qualidade de serviço e do nível de tensão. Uma tensão muito alta pode causar a falha prematura de componentes eléctricos e electrónicos (como placas de circuitos impressos) devido ao sobreaquecimento, estes danos são cumulativos e irreversíveis. De uma forma geral os equipamentos eléctricos e electrónicos aumentam a sua longevidade funcionando a temperaturas mais baixas, ao reduzir ligeiramente a tensão é possível a muitos aparelhos minimizar a sua temperatura mantendo um bom funcionamento.

Para limitar os desvios de tensão na rede de BT pode ser feito o controlo a nível da média tensão no barramento de interligação. Quanto mais alta for a tensão no barramento de interligação mais alta será a tensão na rede de BT. A crescente introdução de micro-geração na rede de baixa tensão provoca a elevação do valor da tensão sendo por isso necessário encontrar formas de controlar esse valor, de forma a poder integrar o máximo de micro-geração é necessário baixar ao máximo admissível a tensão no barramento de interligação. A redução da tensão nesse ponto pode ser feita alterando a posição das tomadas do transformador, alterando a energia reactiva injectada pelos elementos geradores mais próximos com essa capacidade ou utilizando baterias de condensadores.

Como a rede de baixa tensão é explorada de forma radial, existem cargas a alimentar distantes do barramento de interligação com a média tensão, para manter nesses locais a tensão acima do valor mínimo admitido é necessário ter níveis de tensão mais altos nos locais mais próximos desse ponto.

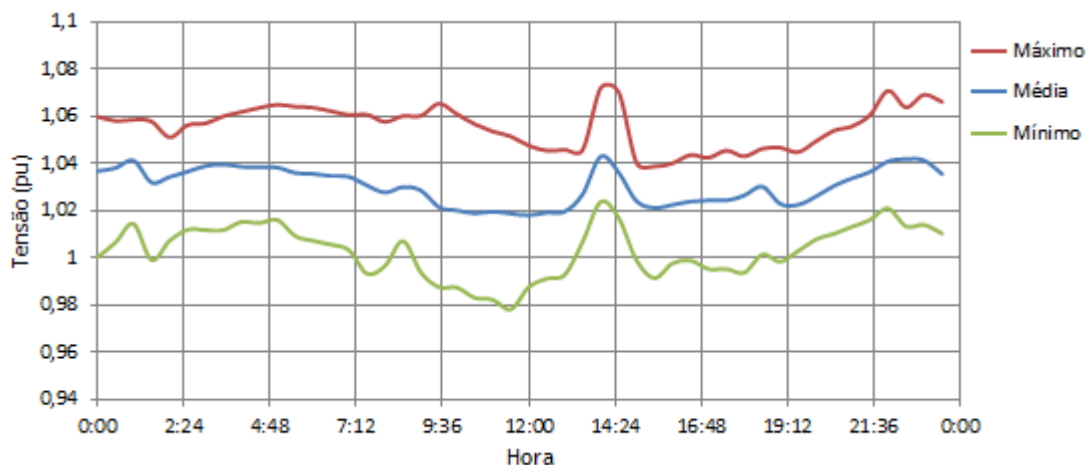


Figura 4.35 - Diferença verificada nos valores de tensão numa das fases, valores mínimos e máximos na zona de Estarreja.

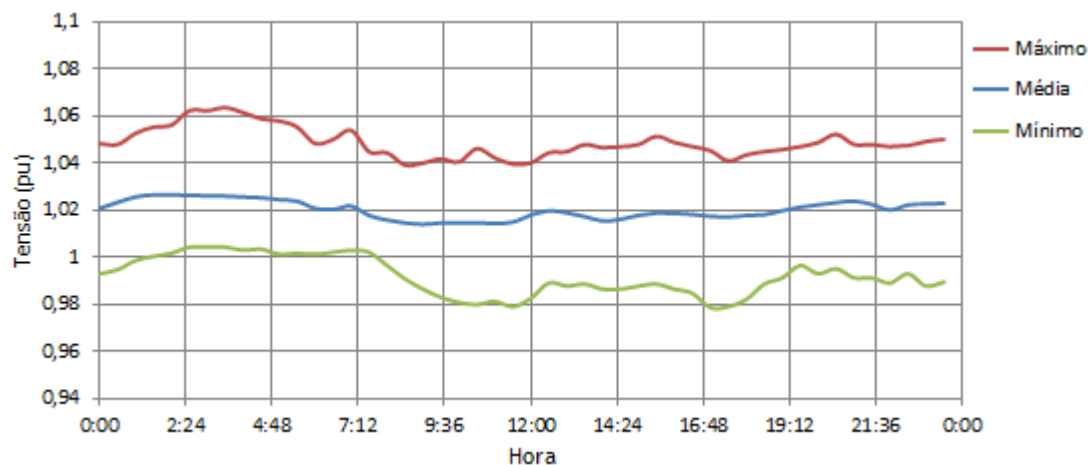


Figura 4.36 - Diferença verificada nos valores de tensão numa das fases, valores mínimos e máximos na zona do Porto.

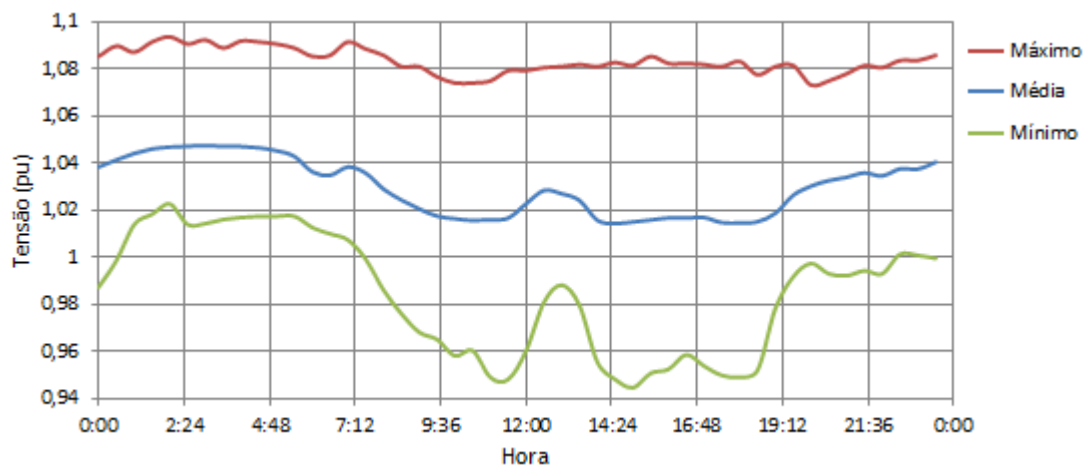


Figura 4.37 - Diferença verificada nos valores de tensão numa das fases, valores mínimos e máximos na zona de Ponte da Barca.

Nos gráficos é possível verificar que a tensão na rede pode variar para dias diferentes, estando o valor médio sempre acima de 230V. Esta variação pode ser vista como uma medida da capacidade da rede, numa rede com maior potência a variação será menor uma vez que o impacto das cargas na tensão da rede será menor. O gráfico apresentado para o Concelho de Ponte da Barca indica a forte variação dos níveis de tensão verificados, neste caso conclui-se que a variação do consumo tem uma grande influência no nível de tensão da rede. Este é um concelho de carácter rural, sendo nestes casos normalmente utilizadas redes radiais mais longas e com menor capacidade de controlo.

4.5. Poupança

O valor de poupança está dependente da tensão presente na rede, do consumo verificado na hora em que é calculada e dos tipos da carga que contribuem para esse consumo.

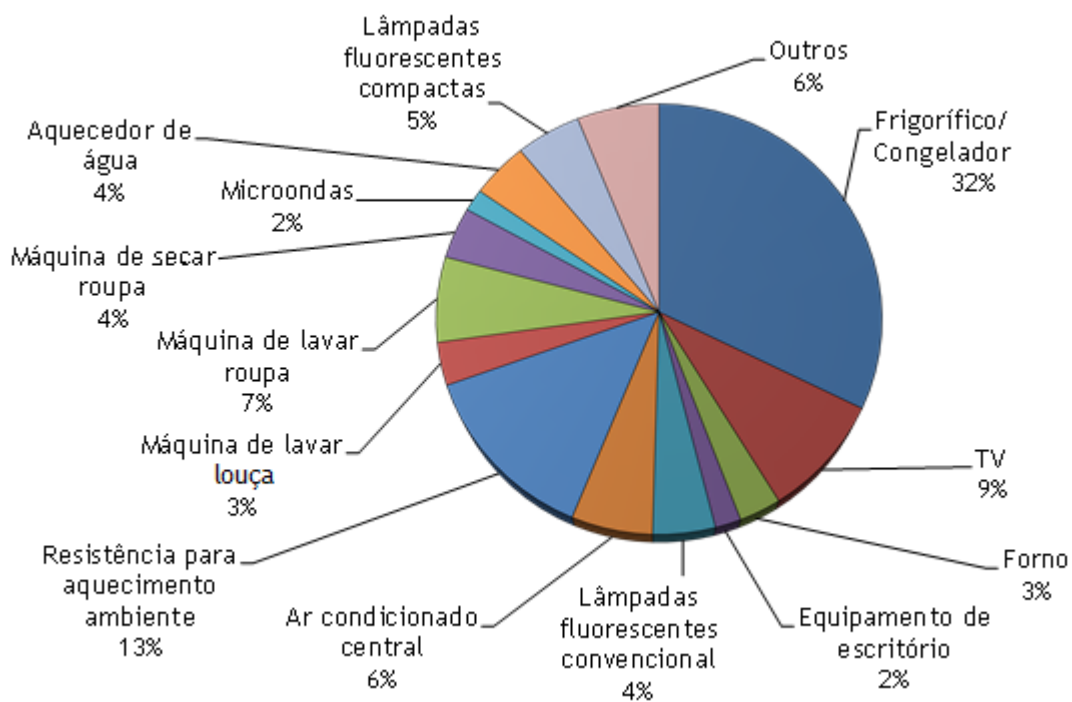


Figura 4.38 - Distribuição do consumo médio diário considerado para o cálculo da poupança.

A distribuição acima indicada foi feita com base na repartição dos consumos de electricidade médios no sector residencial pelos diferentes usos finais (fonte: DGEG Abril de 2004). Para além desta distribuição é necessário considerar também a forma como o consumo de cada um destes equipamentos se distribui ao longo do dia. As percentagens consideradas de consumo que cada equipamento representa nas várias horas ao longo do dia estão representadas nos gráficos em anexo.

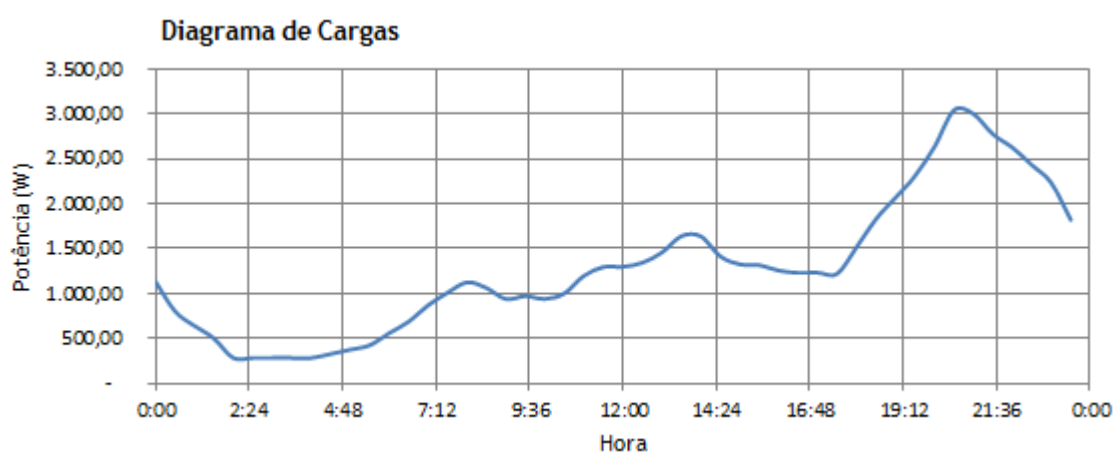


Figura 4.39 - Diagrama de cargas médio considerado no estudo para uma habitação.

O diagrama de cargas é obtido a partir da potência média consumida por cada equipamento e o seu horário de funcionamento. Com a soma de todos os consumos dos equipamentos usados na simulação, em cada hora, foi obtido o gráfico da figura 4.39.

No gráfico da figura seguinte (figura 4.40) é exemplificada a regulação de tensão pretendida, no concelho de Ponte da Barca. Este gráfico é um exemplificativo, uma regulação igual foi considerada também para as zonas do Porto e Estarreja.

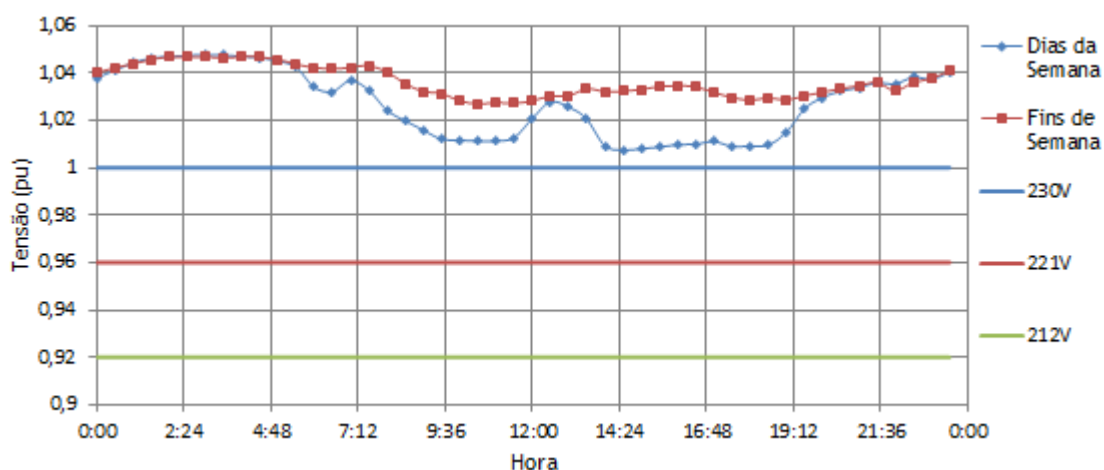


Figura 4.40 - Variação da tensão na rede e valores de regulação utilizados no estudo, Concelho de Ponte da Barca.

Utilizando o diagrama de consumo para cada equipamento e a tensão na rede é possível calcular a redução de potência obtida com a redução da tensão de entrada da habitação. De seguida são apresentados gráficos com os valores obtidos para a tensão presente na rede em dias úteis.

Redução para dias da semana:

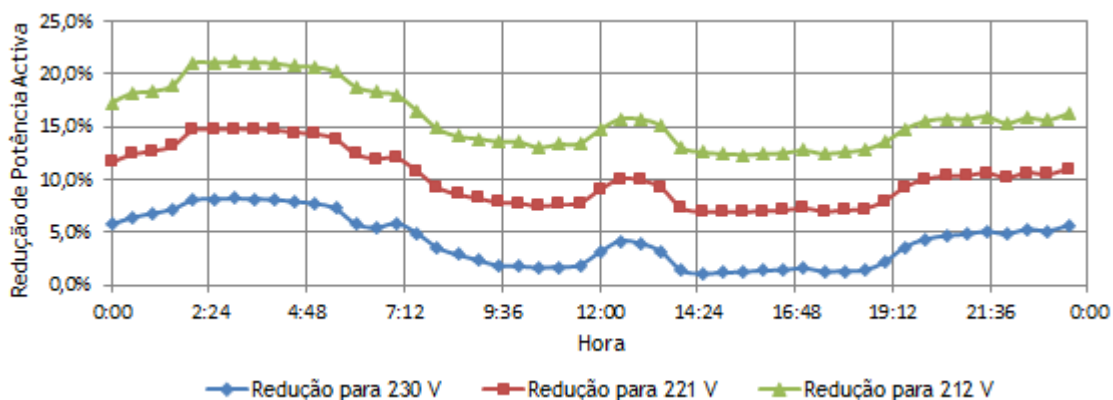


Figura 4.41 - Redução de consumo obtida para os níveis de tensão indicados (dias úteis na zona de Ponte da Barca).

A redução de potência absorvida depende da redução da tensão aplicada como se pode observar no gráfico anterior. No caso do Concelho de Ponte da Barca ao baixar o valor da

tensão para 230V, 221V e 212V obtêm-se reduções médias de 4,2%, 10,2% e 15,9% respectivamente. O valor de redução varia ao longo do dia, esta variação está muito relacionada com a tensão de alimentação fornecida pela rede mas também com o tipo de equipamentos que são utilizados.

Em dias de fim-de-semana, como as grandes cargas industriais normalmente não estão em funcionamento, a tensão na rede apresenta valores superiores, como visto anteriormente. Desta forma a redução no consumo é maior, uma vez que a tensão de alimentação dos equipamentos (tensão da rede) está em valores superiores.

Redução para dias de fim-de-semana:

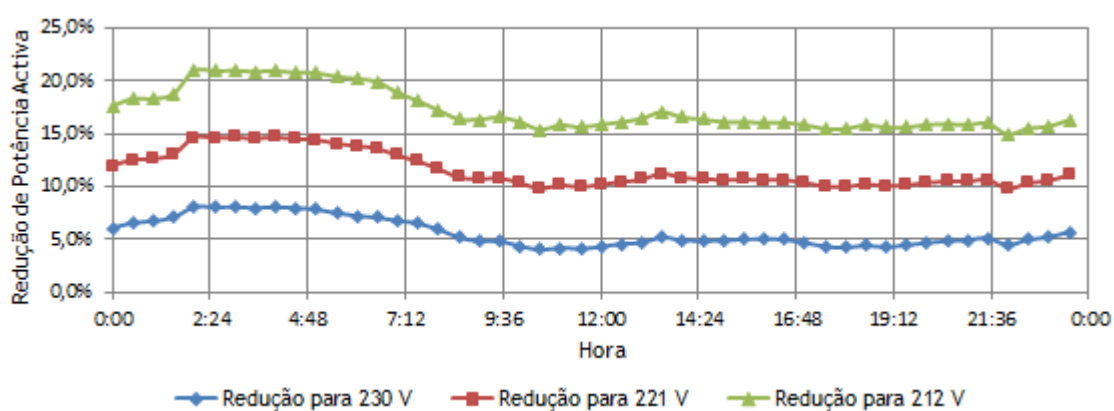


Figura 4.42 - Redução de consumo obtida para os níveis de tensão indicados (fim-de-semana na zona de Ponte da Barca).

Nos fins-de-semana, como a tensão se mantém em valores superiores, obtêm-se percentagens de redução de consumo também superiores. A redução de potência é maior nas horas em que a tensão na rede se encontra com valores superiores (horas de vazio) sendo no entanto nestas horas também menor o consumo total.

Tabela 4.2 - Valores médios percentuais de redução de potência obtidos.

		Redução para 230 V	Redução para 221 V	Redução para 212 V
Estarreja	Dia da Semana	4,3%	10,3%	16,0%
	Fim de Semana	5,6%	11,5%	17,2%
Porto	Dia da Semana	3,0%	8,9%	14,6%
	Fim de Semana	3,4%	9,3%	15,0%
Ponte da Barca	Dia da Semana	4,2%	10,2%	15,9%
	Fim de Semana	5,6%	11,5%	17,2%

A redução de potência é superior nos dias de fim-de-semana pelas razões já mencionadas. Em zonas em que a tensão na rede se apresenta em valores superiores também se verifica maior redução como era expectável.

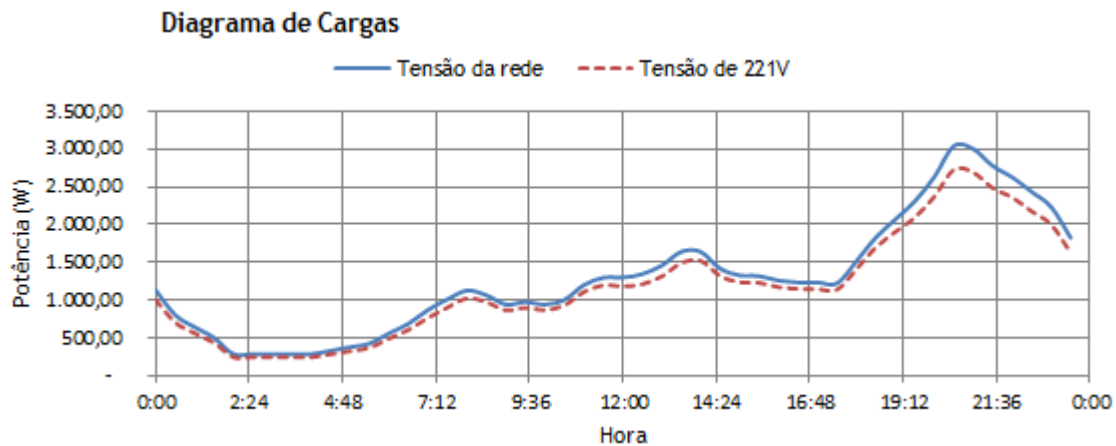


Figura 4.43 - Representação do consumo com diferentes tensões de entrada.

No gráfico é representada a potência de consumo, para dias úteis, quando os equipamentos estão sujeitos à tensão da rede e quando é aplicada a regulação da tensão, neste caso regulação para 0,96 p.u. \approx 221V, valor que é próximo do indicado por muitos equipamentos como valor estipulado de funcionamento.

Uma análise semelhante à apresentada anteriormente para a zona de Ponte da Barca pode também ser feita para o Porto e Estarreja.

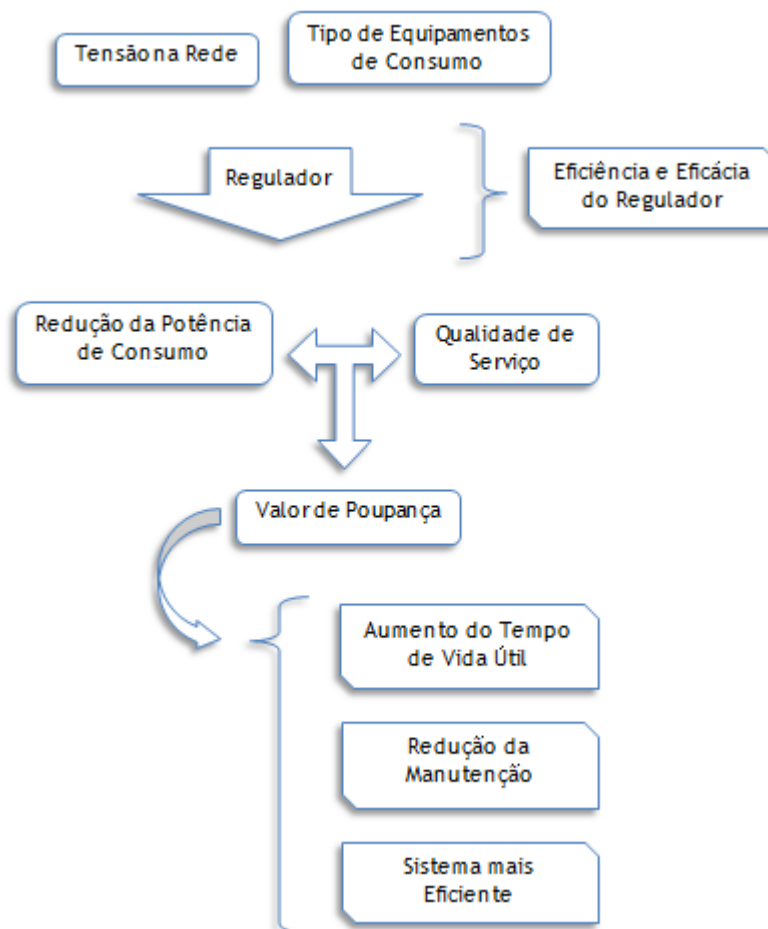


Figura 4.44 - Esquema representativo das variáveis em causa.

O diagrama da figura 4.44 apresenta de forma resumida as variáveis mais importantes no estudo da redução de consumo com a utilização de reguladores de tensão.

A redução de tensão só é uma medida eficaz se permitir baixar o consumo não afectando a qualidade de serviço e a qualidade de funcionamento dos electrodomésticos, caso contrário provocará insatisfação ao utilizador. Ao ajustar o nível de tensão para o valor requerido pelos equipamentos, para além destes consumirem menos energia vão ter um maior tempo de vida útil, menor manutenção e vão funcionar de forma mais eficiente.

Capítulo 5

Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões que podem ser retiradas do trabalho realizado, tendo sempre em consideração os objectivos que foram traçados inicialmente e o contributo que o trabalho teve para o tema. É feita também uma análise de perspectivas de desenvolvimento e trabalhos futuros que podem ser importantes para conferir maior robustez ao estudo realizado.

5.1. Principais Conclusões

Na maioria dos casos a regulação da tensão na rede eléctrica não é usada para aumentar a eficiência energética mas sim como uma forma operacional de manter uma margem de reserva, com esta margem consegue-se que em períodos de maior consumo (horas de ponta do diagrama de cargas) a tensão se mantenha próxima do valor pretendido (230V), ainda que nas restantes horas com o nível de tensão alto haja menor eficiência.

A maior barreira à adopção do método de regulação de tensão é o cepticismo na relação existente entre a redução da tensão e a redução da carga. A ideia generalizada de que as cargas “puxam” mais corrente quando lhes é aplicada tensão mais baixa e de que assim a redução de tensão só aumentaria as perdas nas linhas de transmissão é apenas correcta para uma pequena parte da carga. Os dados provam que a maioria das cargas consome menos energia quando operadas com tensões mais baixas dentro da gama aceitável.

Críticos referem que esta redução de consumo é apenas temporária uma vez que o utilizador vai ajustar o seu consumo no sentido contrário, vai utilizar potências superiores nos seus equipamentos. No entanto todos os equipamentos têm uma tensão para a qual o seu funcionamento é mais eficiente, estando este valor situado na maioria dos casos entre 220 e 230V o que permite concluir que como a tensão na rede se encontra em valores muitas vezes superiores é possível obter uma redução de consumo mantendo a qualidade de serviço, com isso é ainda prolongado o tempo de vida dos equipamentos e reduzida a manutenção.

5.2. Objectivos Alcançados

Um dos principais objectivos deste trabalho foi perceber a relação existente entre a energia consumida e a tensão aplicada, para esse efeito foram analisados modelos de carga e foram feitas medições da variação da potência em função da tensão em equipamentos reais. Estas medições apresentaram resultados de acordo com o esperado, no entanto não foi possível efectuar experiências com todos os tipos de equipamentos consumidores.

O estudo do perfil de tensão da rede foi um objectivo proposto revelando-se um aspecto de grande importância quanto a poupança alcançável com a redução da potência absorvida. Como o perfil diário de tensão está dependente da zona geográfica é sempre necessário ter o conhecimento das características da rede nessa zona.

Outro dos objectivos desta dissertação era caracterizar o funcionamento de equipamentos reguladores de tensão existentes na forma como actuam, deste estudo foram tiradas conclusões sobre qual a tipologia de reguladores mais adequada ao funcionamento requerido.

Concluiu-se por fim que com um controlo de tensão adequado é possível obter significativas reduções de consumo em cenários de consumo característicos do sector residencial.

5.3. Trabalhos Futuros

Apesar do estudo feito já dar uma percepção do comportamento da carga e do consumo com a variação da tensão aplicada, muito poderá ainda ser feito para obter a máxima eficiência possível:

- Desenvolver um sistema optimizado de controlo para o regulador;
- Avaliar a redução na factura energética com a regulação da tensão em instalações reais com a instalação do regulador, avaliando assim também a qualidade de serviço com a utilização da tensão mais baixa;
- A metodologia de regulação da tensão pode ser aplicada a outras situações concretas como em sistemas de iluminação ou no funcionamento de motores sendo o sistema de controlo devidamente adequado ao objectivo pretendido.

Referências

1. EDP. "Guia da Eficiência Energética". 2008 [cited 2011 29-05-2011]; Available from: http://www.eco.edp.pt/images/stories/Guia_da_Eficiencia_energetica.pdf.
2. ECO.EDP. [cited 2011 27-05-2011]; Available from: <http://www.eco.edp.pt/pt/particulares/conhecer/o-que-e-a-eficiencia-energetica/em-portugal>.
3. "Eficiência energética nos edifícios residenciais". Manual do Consumidor 2008 [cited 2011 22-05-2011]; Available from: http://www.adene.pt/NR/rdonlyres/454D170F-48C9-484A-9868-DEC14FBF46BA/803/EE_EdRes_enerbuilding.pdf.
4. N. Mithulananthan, M.M.A.S., C. A. Cañizares and J. Reeve, "Distribution system voltage regulation and var compensation for different static load models". International Journal of Electrical Engineering Education 37/4.
5. Neves, M.S., "Modelagem de Carga em Sistemas de Energia Elétrica: Modelo Matemático e sua Validação com Testes de Campo". 2008, Universidade Federal de Juiz de Fora.
6. Ning Lu, Y.X., Zhenyu Huang, Francis Puyleart and Steve Yang, "Load Component Database of Household Appliances and Small Office Equipment". PNNL-SA-57500, 2008.
7. Hajagos, L.M. and B. Danai, "Laboratory measurements and models of modern loads and their effect on voltage stability studies". Power Systems, IEEE Transactions on, 1998. 13(2): p. 584-592.
8. Concordia, C. and S. Ihara, "Load Representation in Power System Stability Studies". Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, 1982. PAS-101(4): p. 969-977.
9. Gellings, C.w., "Enabling Energy Efficiency and Demand Response", in *The Smart Grid*. 2009, The Fairmont Press. p. 43-46.
10. Lefebvre, S., et al. "Measuring the efficiency of voltage reduction at Hydro-Québec distribution". in *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*. 2008.
11. "Load representation for dynamic performance analysis" [of power systems]. Power Systems, IEEE Transactions on, 1993. 8(2): p. 472-482.
12. Kirshner, D. and P. Giorsetto, "Statistical Tests of Energy Savings Due to Voltage Reduction". Power Engineering Review, IEEE, 1984. PER-4(6): p. 30-31.
13. UST - Utility Systems Technologies, I. "The Automatic Voltage Regulator - AVR: Guide and Comparison". [cited 2011 28-05-2011]; Available from: http://www.ustpower.com/Support/Voltage_Regulator_Comparison/Ferroresonant_Transformer_CVT/Constant_Voltage_Transformer_Advanatages.aspx.
14. Scalley, B.R. and D.G. Kasten, "The Effects of Distribution Voltage Reduction on Power and Energy Consumption". Education, IEEE Transactions on, 1981. 24(3): p. 210-216.
15. Chen, M.S., et al., "The Effects of Reduced Voltages on the Efficiency of Electric Loads". Power Engineering Review, IEEE, 1982. PER-2(7): p. 53-53.
16. "Standard load models for power flow and dynamic performance simulation". Power Systems, IEEE Transactions on, 1995. 10(3): p. 1302-1313.

17. ENERGY, L. "Energy saving by voltage reduction". [cited 2011 20-03-2011]; Available from: <http://www.leonardo-energy.org/energy-saving-voltage-reduction>.
18. Jayamaha, D.L., "Energy-Efficient Building Systems: green strategies for operation and maintenance". 2006. p. 200.
19. Stefan Fassbinder, B.D.W., "The Electrical System as a Tandem Bicycle". 2005.
20. Byoung-Kon, C., et al. "Development of composite load models of power systems using on-line measurement data". in *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE*. 2006.
21. André A.P.Lerm, L.V.B., Márcio H.Costa, Delmar B.Carvalho, "Modelagem de Cargas Eléctricas Agregadas". Laboratório de Sistemas de Energia, Curso de Engenharia Eléctrica, Universidade Católica de Pelotas.
22. Keyhani, A., L. Wenzhe, and G.T. Heydt. "Neural network based composite load models for power system stability analysis". in *Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications, 2005. CIMSAA. 2005 IEEE International Conference on*. 2005.
23. "Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation". *Power Systems, IEEE Transactions on*, 1995. 10(1): p. 523-538.
24. Amaral, M.B.d., "Modelagem Estática de Carga por Meio de Medição Direta: Proposição de uma Metodologia Sistematizada, seus Impactos e Benefícios.", in *Engenharia Eléctrica*. 2004, Universidade Federal de Juiz de Fora: Juiz de Fora.
25. Pyone, Y.Y. "Design of Transformers for 60 kVA Automatic Voltage Stabilizer". in *Computer and Automation Engineering, 2009. ICCAE '09. International Conference on*. 2009.
26. IREM-Stabilux, "The Clever Saving - Luminous flux regulators": Torino - Italy.
27. Colak, I. and S. Ertike. "A new type single phase switching voltage regulator". in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE*. 2010.
28. "AC Automatic Voltage Stabilisers and Regulators". [cited 2011 28-05-2011]; Available from: <http://www.ashleyedison.com/voltage-stabilizer-design.htm>.
29. Answers.com. "Voltage Regulator". Available from: <http://www.answers.com/topic/voltage-regulator>.
30. Corporation, G.T. "Ferroresonant Transformers". [cited 2011 28-05-2011]; Available from: <http://www.generaltransformer.com/transformer/ferroresonant-transformers.htm>.
31. ERSE. "Relatório da Qualidade de Serviço do Sector Eléctrico 2009". 2010 [cited 2011 15-05-2011]; Available from: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/qualidadedeservico/relatoriodaqualidadedeservico/Documents/Relat%C3%B3rio%20QS%202009-ERSE.pdf>.
32. "Regras Técnicas das Instalações Eléctricas de Baixa Tensão". PORTARIA N.º 949-A, 11 de Setembro de 2006.
33. Portugal Eficiência 2015 - "Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética (PNAEE)". Fevereiro 2008.
34. "A utilização racional de energia em edifícios públicos". 2008 [cited 2011 21-05-2011]; Available from: http://www.adene.pt/NR/rdonlyres/00000322/hargjhozdtkatsvlfzoynsfjtuciexxo/URE_EdP%C3%BAblic_enerbuilding.pdf.
35. Amorim, A., "Novas Tecnologias na Iluminação Pública". 2009, EDP
36. BELIEF. "Iluminação Pública de Vila Nova de Gaia". [cited 2011 26-05-2011]; Available from: http://www.energia.pt/belief/newsletters/newsletter_8/index.html.
37. Ceclan, A., et al. "Public lighting systems an energy saving technique and product". in *Clean Electrical Power, 2007. ICCEP '07. International Conference on*. 2007.
38. EUROPA, E. "Reduce the Costs of Lighting Systems". [cited 2011 20-05-2011]; Available from: <http://www.energia-europa.it/prodotti.php?pagina=prodotto&prodotto=e-box&lang=en>.
39. Chung, H.S.H., et al. "Case study of a highly-reliable dimmable road lighting system with intelligent remote control". in *Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on*. 2005.

40. Roma, et al. "Matrix converter applied to energy saving for street lighting systems". in *MELECON 2010 - 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*. 2010.
41. PowerSines. "Energy Efficiency Technology with the Right Voltage". [cited 2011 27-05-2011]; Available from: <http://www.powersines.com/apage/54129.php>.
42. EUROPA, E. "Reduces the Energy Costs of Your Home". [cited 2011 20-05-2011]; Available from: <http://www.energia-europa.it/prodotti.php?pagina=optional&prodotto=e-home&lang=en#prod>.
43. PowerPerfector. "Energy efficiency is a pro growth, pro climate way forward". [cited 2011 22-05-2011]; Available from: <http://www.powerperfector.com/Product/technical-info.htm>.
44. StreamlinePower. "Voltage Optimisation". [cited 2011 18-05-2011]; Available from: http://www.streamline-power.com/voltage_optimisation.html.
45. StreamlinePower. "An Introduction to Voltage Optimisation". [cited 2011 22-05-2011]; Available from: http://www.streamline-power.com/downloads/Overview_of_Voltage_Optimisation.pdf.
46. PowerPerfector. "Voltage Power Optimisation". [cited 2011 24-05-2011]; Available from: <http://www.powerperfector.com/Downloads/general/pP%20Brochure%20for%20download.pdf>.
47. PowerSaver. "Energy efficiency can be mined just like any other resource". [cited 2011 28-05-2011]; Available from: <http://www.powersaver.net.au/>.
48. Direcção Geral de Geologia e Energia (DGGE), "Eficiência energética em equipamentos e sistemas eléctricos no sector residencial". Abril 2004.
49. EDPserviço-universal. "Tarifas Baixa Tensão Normal até 20,7kVA". [cited 2011 10-06-2011]; Available from: <http://www.edpsu.pt/pt/particulares/tarifasehorarios/BTN/Pages/TarifasBTNate20.7kVA.aspx>.

Anexo A

Neste anexo são apresentados gráficos de variação da potência em função da tensão para os equipamentos utilizados no cálculo da redução de consumo, para cada um destes equipamentos é também indicada a variação da resistência e da reactância. Outro aspecto importante no cálculo da poupança, referido no capítulo 3, é o horário de funcionamento dos equipamentos o que altera a carga característica da habitação em cada instante, a variação do peso da carga de cada equipamento ao longo do dia considerada neste estudo é também apresentada neste anexo. As características dos equipamentos de medição utilizados na realização dos ensaios de laboratório estão também aqui indicadas.

A.1.Características das Cargas (electrodomésticos)

Esta caracterização é feita com base nos parâmetros disponíveis em estudos feitos anteriormente [4-7] já referidos nos capítulos anteriores.

Frigorífico, congelador

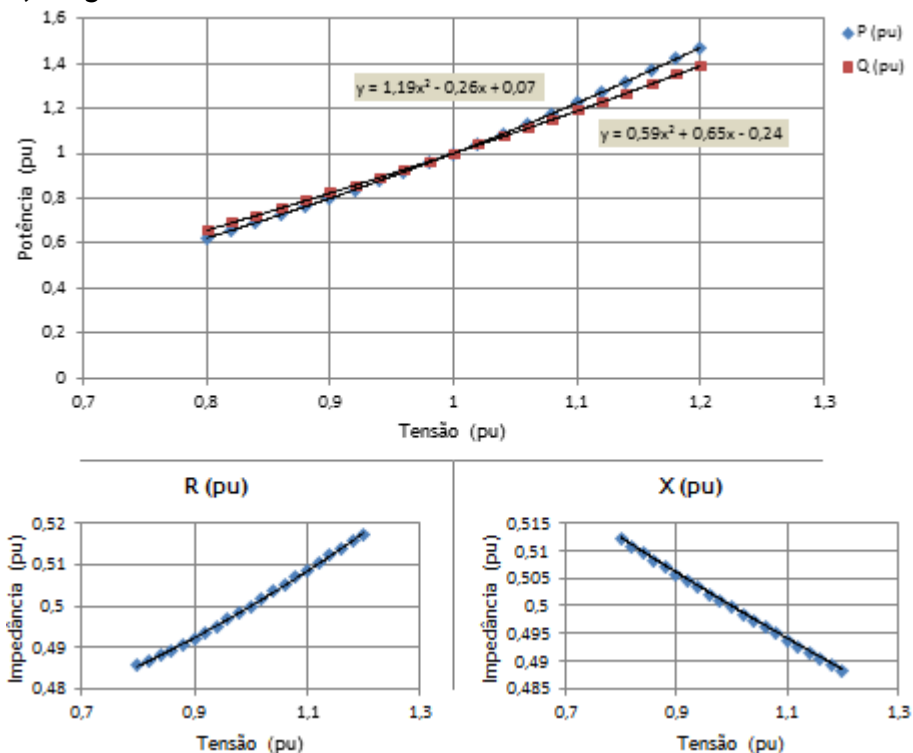


Figura A.1 - Variação da potência, resistência e reactância em função da tensão para o frigorífico/congelador.

Equipamentos audiovisuais (televisão, rádio, etc.)

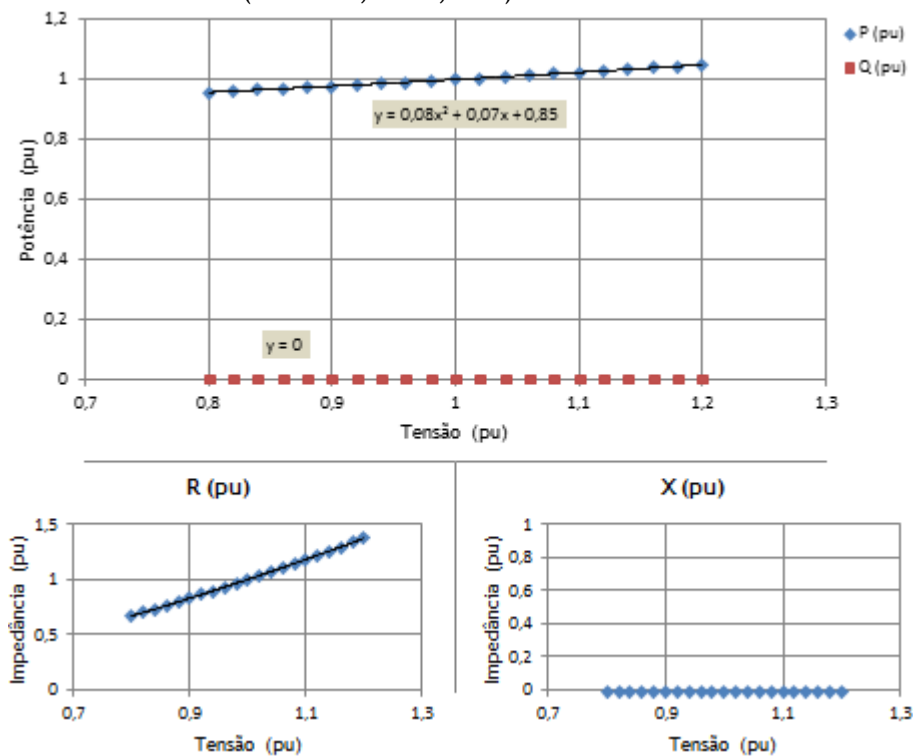


Figura A.2 - Variação da potência, resistência e reactância em função da tensão para equipamentos audiovisuais.

Microondas

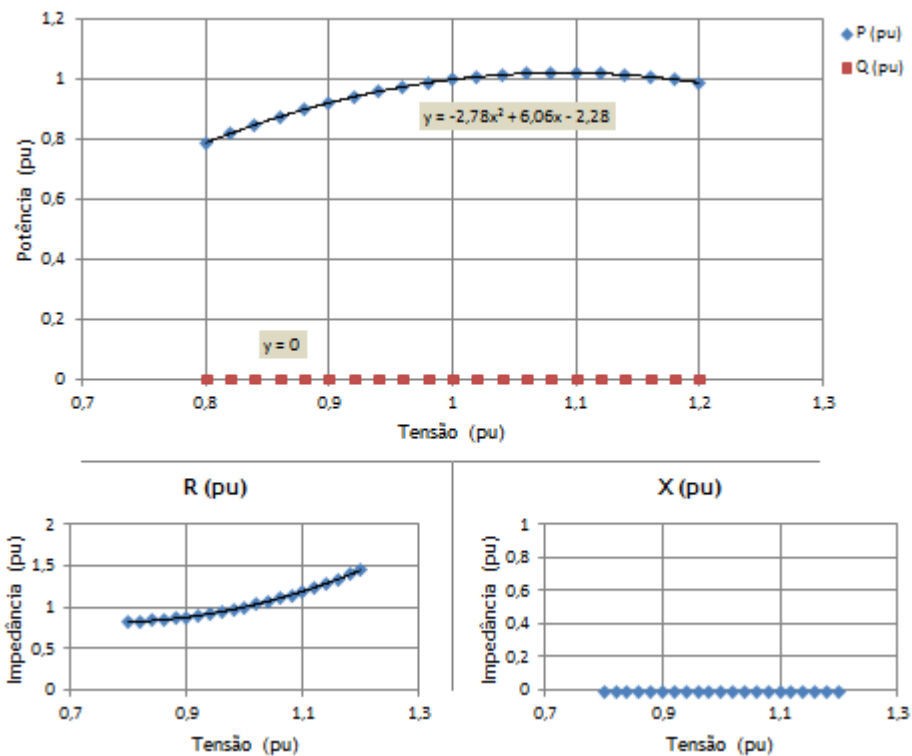


Figura A.3 - Variação da potência, resistência e reactância em função da tensão para o microondas.

Forno eléctrico

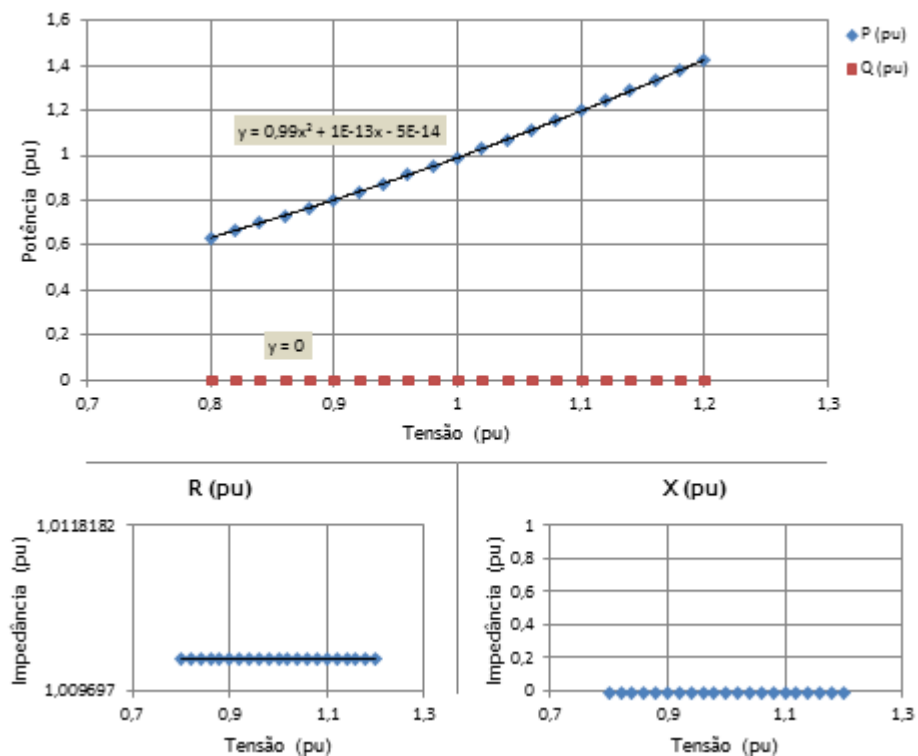


Figura A.4 - Variação da potência, resistência e reactância em função da tensão para o forno.

Equipamentos de Informática (computadores)

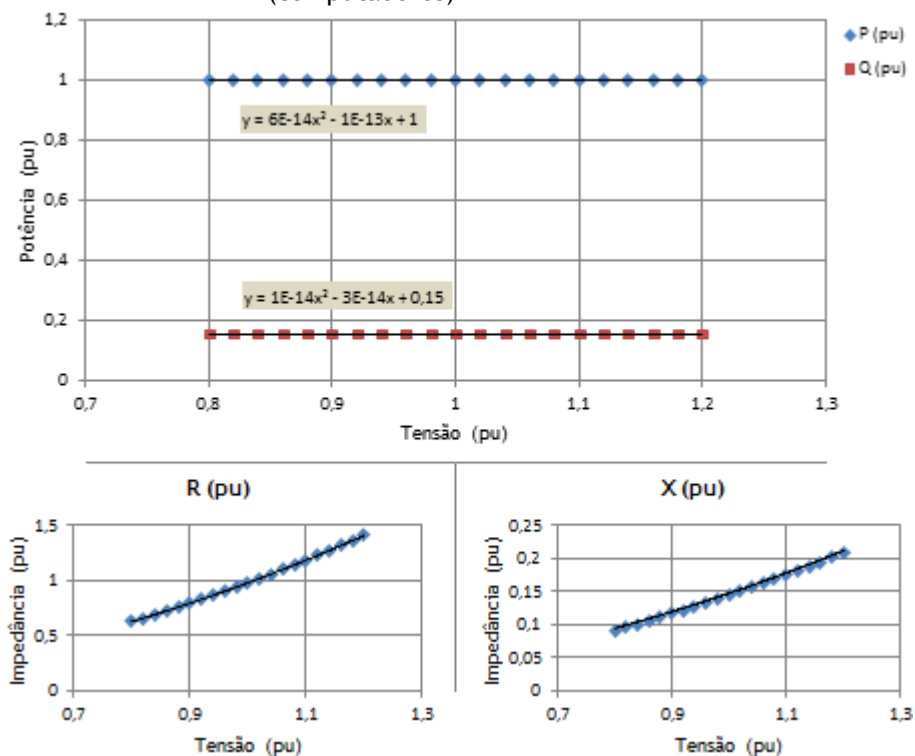


Figura A.5 - Variação da potência, resistência e reactância em função da tensão para equipamentos informáticos.

Lâmpadas Incandescentes

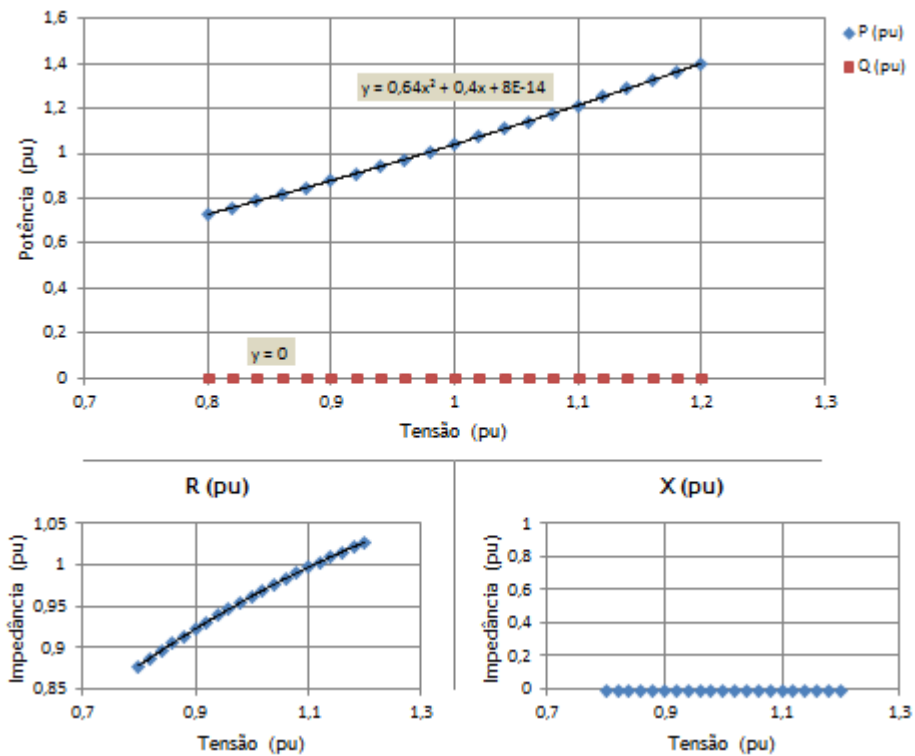


Figura A.6 - Variação da potência, resistência e reactância em função da tensão para lâmpadas incandescentes.

Lâmpadas fluorescentes compactas

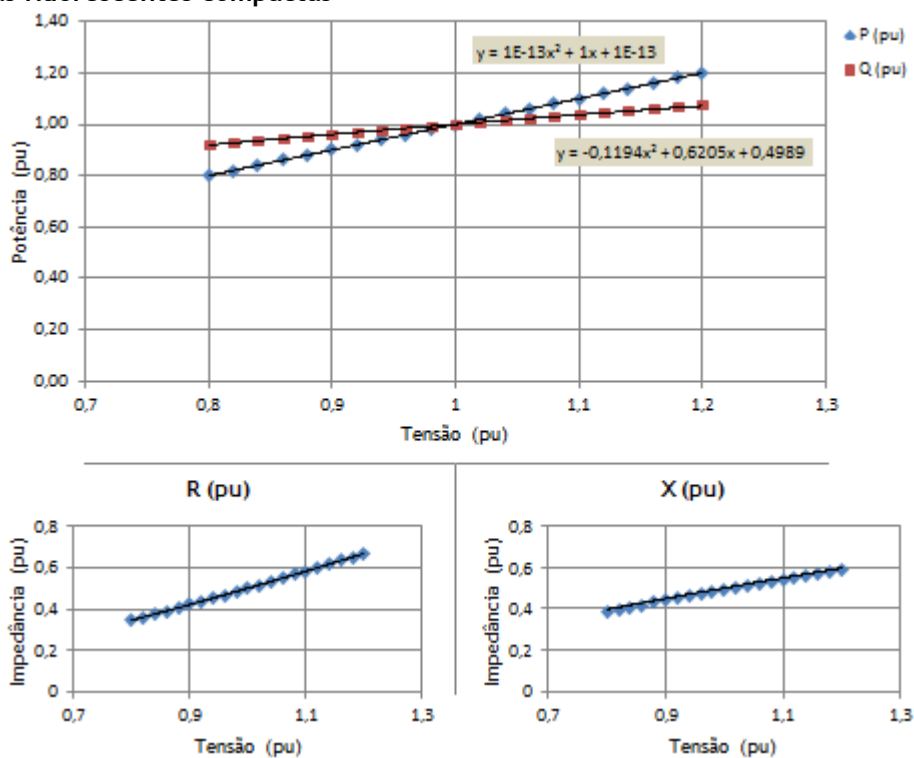


Figura A.7 - Variação da potência, resistência e reactância em função da tensão para as lâmpadas fluorescentes compactas.

Lâmpadas fluorescentes convencionais

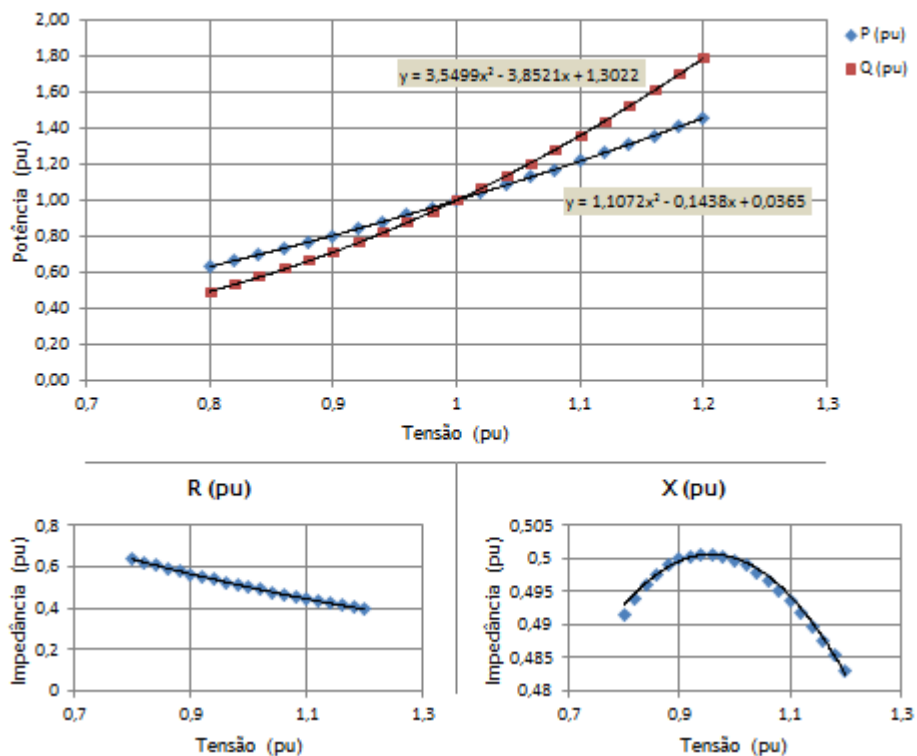


Figura A.8 - Variação da potência, resistência e reactância em função da tensão para as lâmpadas fluorescentes convencionais.

Ar condicionado central

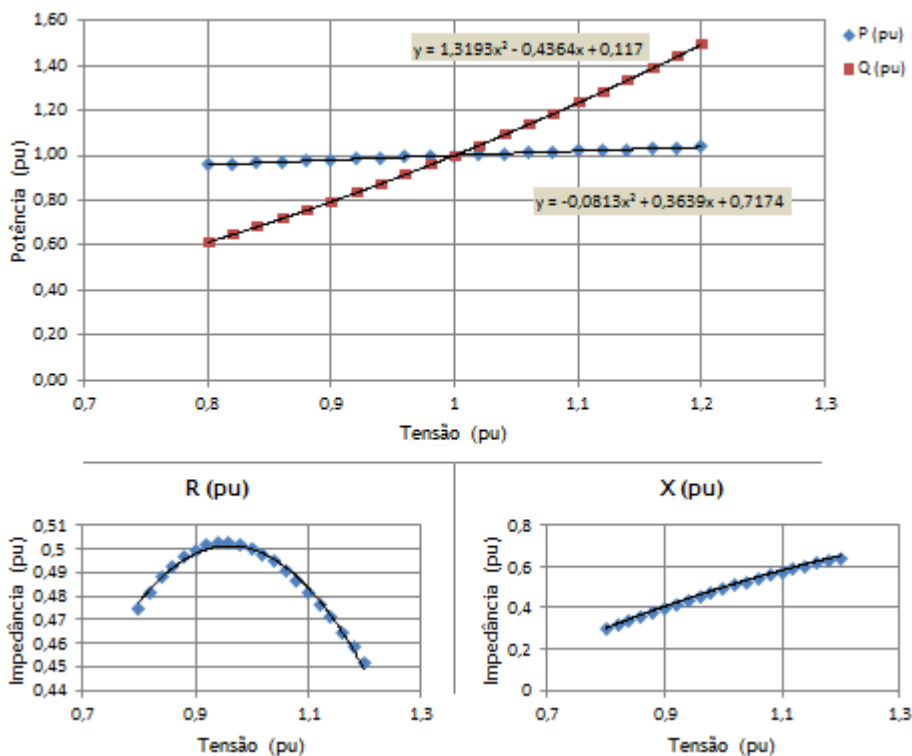


Figura A.9 - Variação da potência, resistência e reactância em função da tensão para sistemas de ar condicionado.

Cargas Resistivas (Termoacumulador, resistências para aquecimento ambiente, etc.)

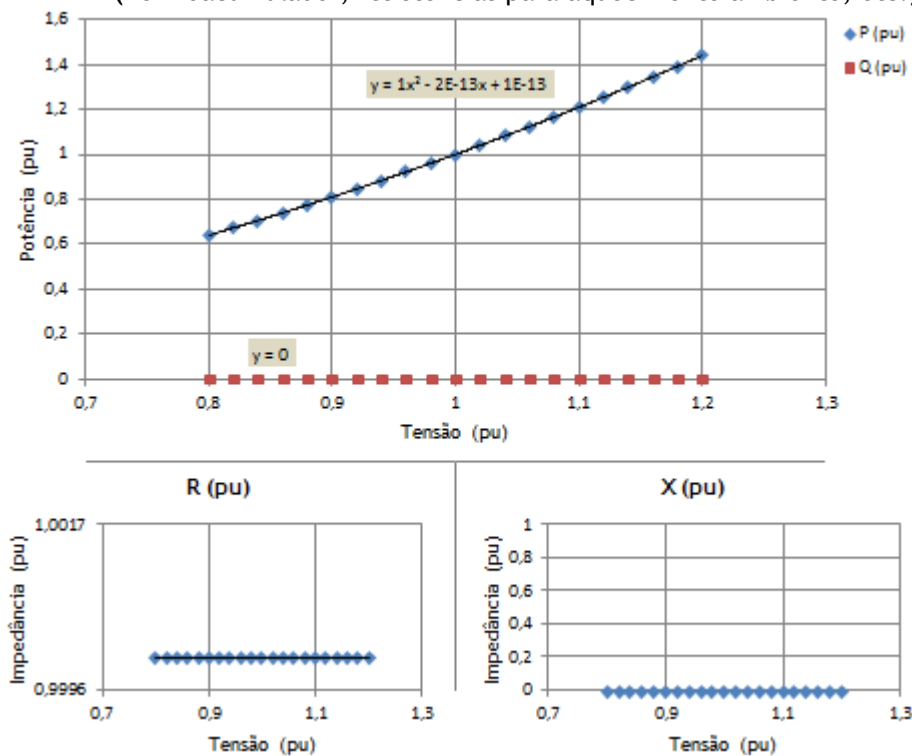


Figura A.10 - Variação da potência, resistência e reactância em função da tensão para cargas resistivas.

Máquina de lavar louça

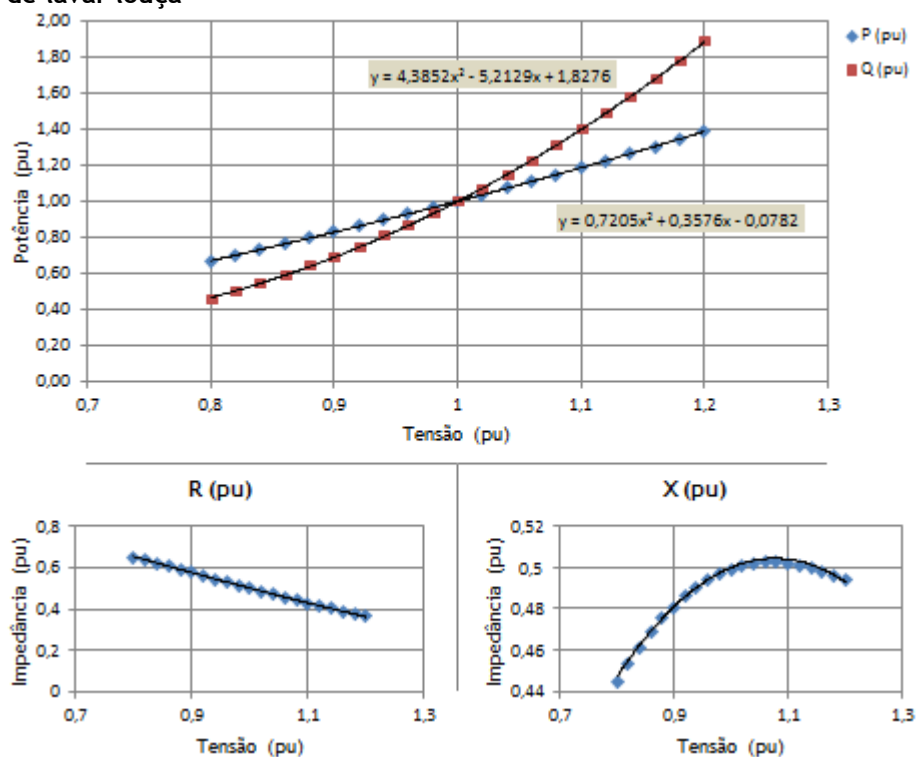


Figura A.11 - Variação da potência, resistência e reactância em função da tensão para a máquina de lavar louça.

Máquina de lavar roupa

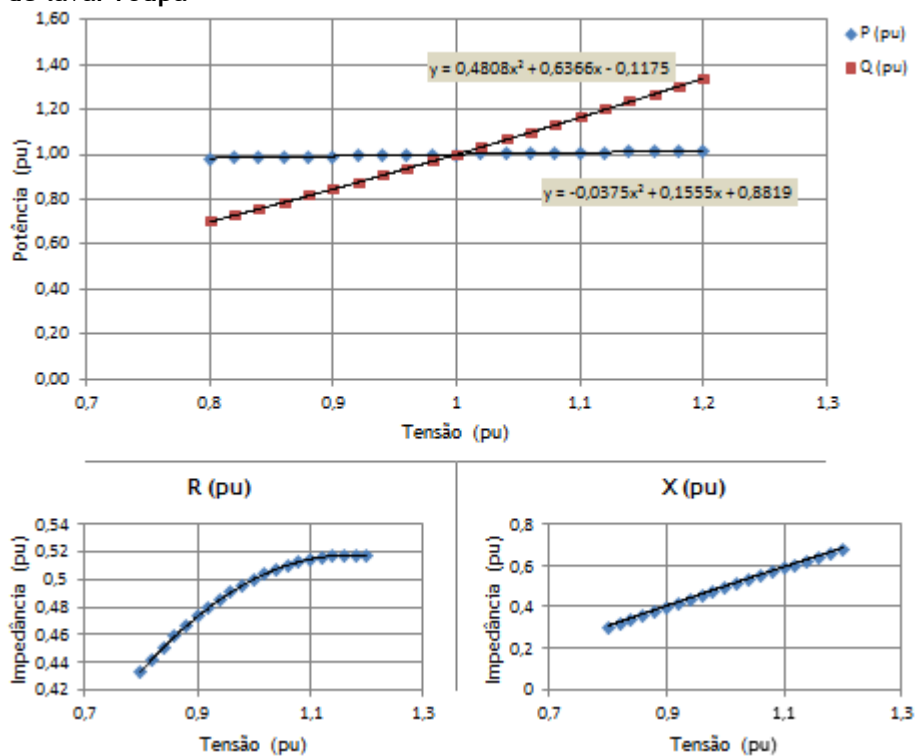


Figura A.12 - Variação da potência, resistência e reactância em função da tensão para a máquina de lavar roupa.

Máquina de secar roupa

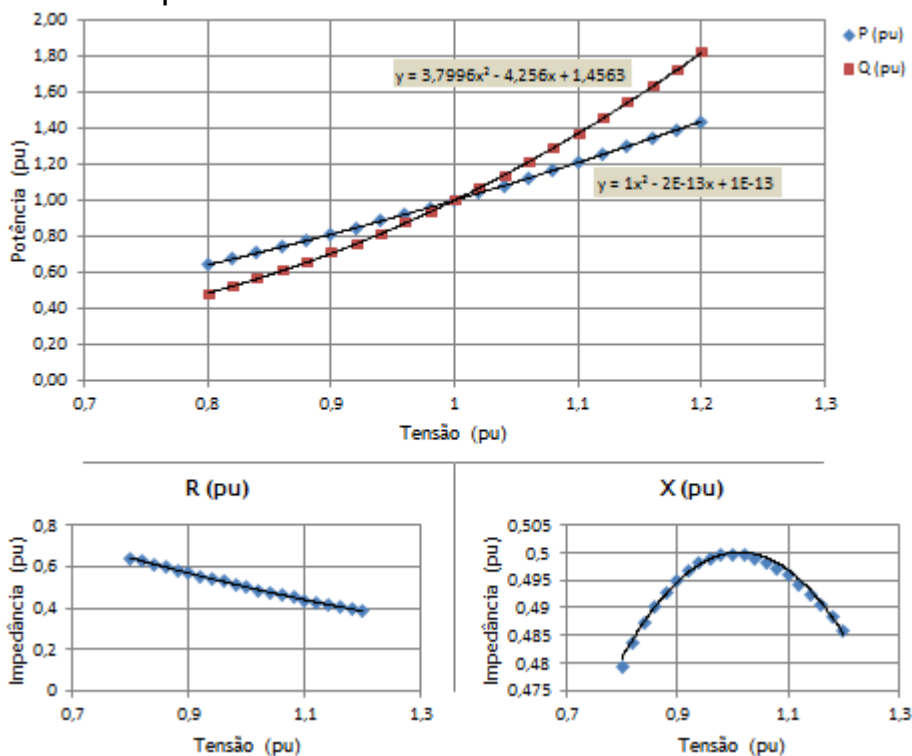
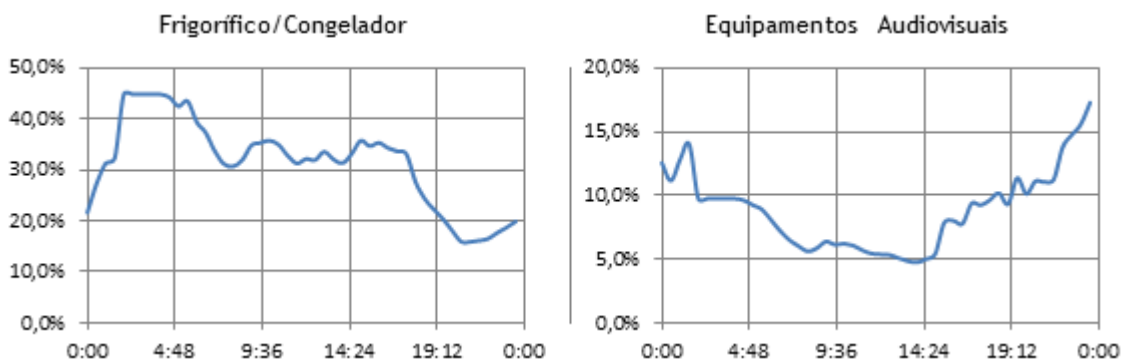
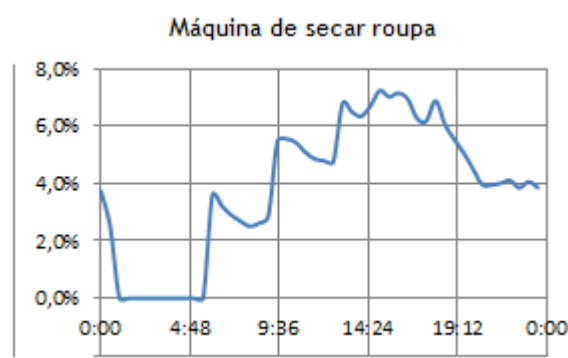
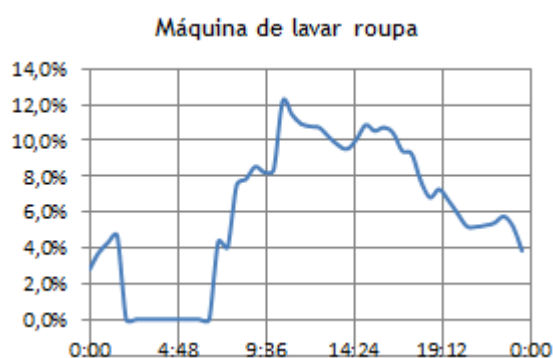
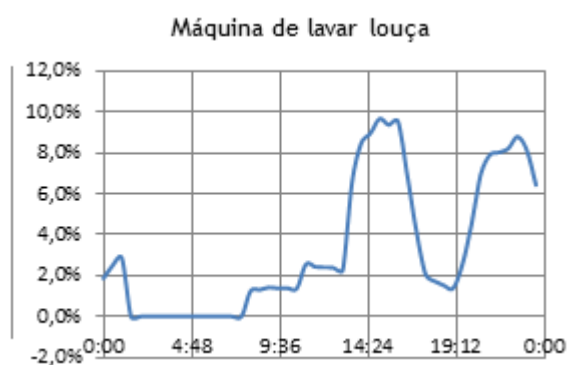
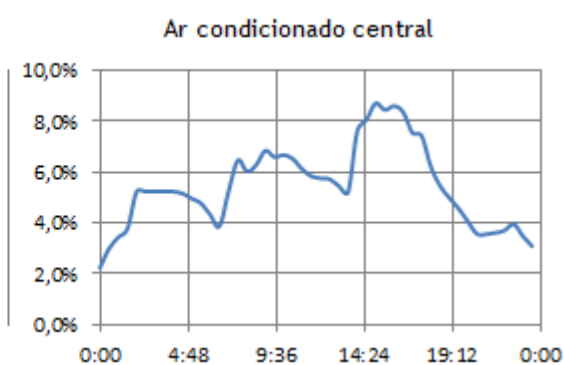
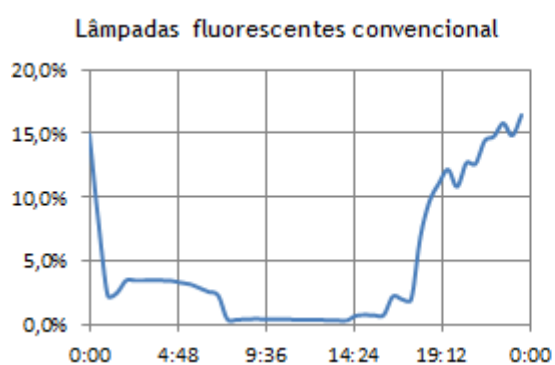
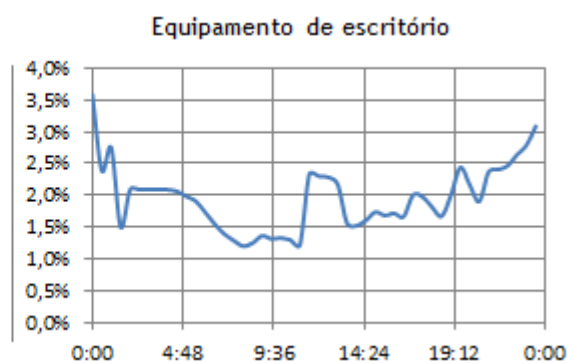
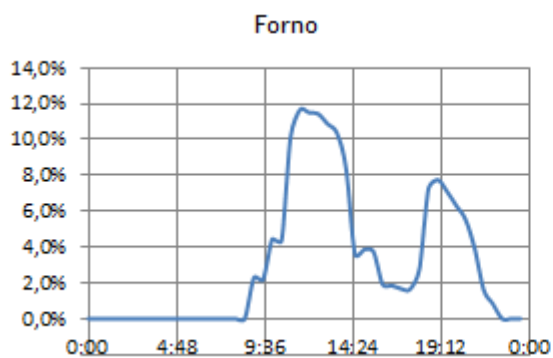


Figura A.13 - Variação da potência, resistência e reactância em função da tensão para a máquina de secar roupa.

A percentagem de carga de cada equipamento ao longo do dia considerada para o cálculo da redução de consumo alcançável é apresentada de seguida. Nesta representação foi tido em conta a distribuição de consumo por diferentes tipos de carga no sector residencial apresentada na figura 3.1 (capítulo 3).





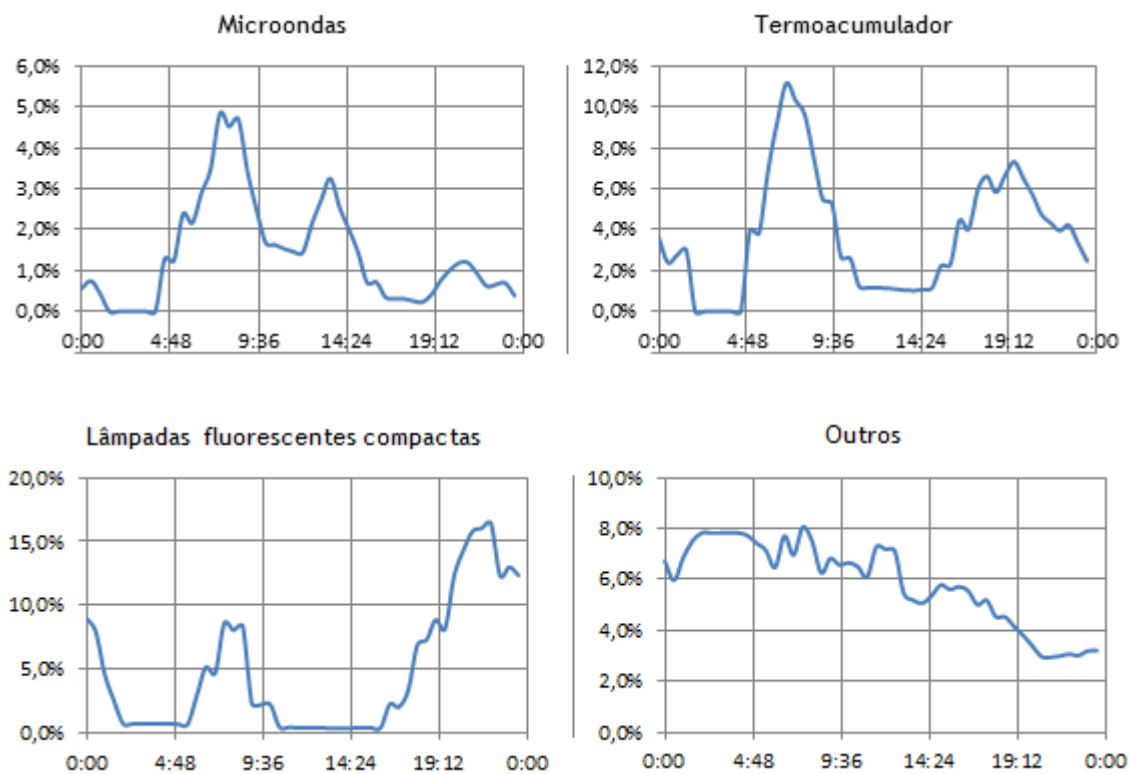







Figura A.14 - Peso de cada tipo de carga no total, ao longo do dia.

A.2. Equipamentos de medição

As características dos equipamentos utilizados na realização dos ensaios de laboratório são apresentadas na tabela seguinte.

Tabela A.1 - Características dos equipamentos utilizados

Autotransformador		Trifásico U=400V, I=13 A, S=10,14 kVA
Voltímetro AC		Calibres: U=750V, 300V, 75V N.º de divisões: 10
Amperímetro AC		Calibres: I=10 A; 20A N.º de divisões: 10
Wattímetro		Calibres: U=480V; 240V; 120V I=25A; 12,5 A
Pinça Amperimétrica		Corrente AC 1mA/A - 200A