

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Impacto do Desequilíbrio Trifásico nas Perdas de uma Rede de Distribuição BT

Rafael Correia Cavalheiro

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Doutor José Nuno Fidalgo

Coorientador: Prof. Doutor Carlos Moreira

5 de Maio de 2018

Resumo

Devido à crescente procura energética constatada nas últimas décadas, o Sistema Elétrico de Energia (SEE) tem sido alvo de estudo e investimento de modo a aumentar a eficiência das suas redes elétricas. Uma das formas de aumentar os níveis de eficiência das redes, passa por adoptar estratégias que permitam a redução das perdas energéticas inerentes às redes de distribuição de energia.

Sendo as redes de distribuição, nomeadamente as redes de distribuição BT, as que mais contribuem para as perdas elétricas do SEE, estas têm sido objeto de vários estudos. Um dos fatores conhecidos que contribui para o aumento das perdas verificadas nas redes BT é o desequilíbrio trifásico presente neste tipo de redes.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito da Unidade Curricular Dissertação, do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores, do ramo de Energia, adotando uma metodologia de simulação de cenários com o intuito de estudar o impacto do desequilíbrio trifásico nas perdas de uma rede de distribuição BT e analisar o impacto que a iluminação pública e a integração da produção dispersa possam ter no estado de equilíbrio trifásico e nas consequentes perdas.

De modo a credibilizar os resultados deste estudo, foi estudada uma rede de distribuição BT real, com dados reais acerca da distribuição de cargas por fase presente na rede. Os resultados deste trabalho demonstram que é possível tomar medidas para a redução de perdas através da diminuição dos níveis de desequilíbrio trifásico.

Abstract

Due to the increasing energy demand verified in the last decades, the electrical energy system has been the object of study and investment in order to increase the efficiency of its electrical networks. One of the ways to increase the efficiency levels of the networks is to adopt strategies that allow the reduction of energy losses inherent to the energy distribution networks.

Since distribution networks, such as BT distribution networks, are the ones that most contribute to the electrical losses of the SEE, these are the object of several studies. One of the known factors that contribute to the increase of the losses verified in the BT networks is the three-phase imbalance present in this type of networks.

This work was developed in the scope of the Curricular Unit Dissertation, of the Integrated Master in Electronic Engineering and Informatics, of the Energy branch, adopting a methodology of simulation of scenarios in order to study the impact of the three-phase imbalance in the losses of a distribution network and analyze the impact of public lighting and integration of the dispersed production may have in the three-phase imbalance and consequential energy losses.

In order to give credibility to the results of this study, a real BT distribution network was studied, with real data about the distribution of loads per phase present in the network. The results of this work demonstrate that it is possible to take measures to reduce losses by reducing the levels of three-phase imbalance.

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador Prof. Doutor José Nuno Fidalgo pela grande disponibilidade demonstrada, por todo o conhecimento que me passou ao longo deste projeto e pelo constante incentivo que foi crucial para a realização desta dissertação. Quero também agradecer ao meu coorientador Prof. Doutor Carlos Moreira por me ter cedido a ferramenta de simulação, bem como pelo conhecimento transmitido acerca da mesma.

Agradeço ao Engenheiro Ricardo Prata da EDP Distribuição por ter cedido os dados necessários à realização deste estudo.

Agradeço a toda a minha família, nomeadamente ao meu pai pela constante disponibilidade para me ajudar sempre que tive dúvidas, fazendo sempre críticas construtivas tentando tirar o melhor de mim. À minha super mãe por todo o apoio e preocupação demonstrados toda a minha vida, e por fim, à minha irmã por ser uma grande chata e me proporcionar momentos de descontração que são sempre precisos.

Quero agradecer à Ana Aguiar por todo o carinho e apoio, por ter o sentido de aventura e ser a minha companheira de viagens sempre que possível, por ser o meu pilar nos momentos mais difíceis e por ser a principal razão da minha felicidade. Um obrigado à melhor namorada do mundo.

Por fim, quero agradecer a todos os meus amigos do Agressividades por serem o maior exemplo de ética de trabalho ao longo do curso. Ao Rui Alves e Zedgar Couto por me acompanharem desde o 1º ano e por fazerem a experiência da faculdade ser melhor. Ao Radares, Chaveiro e George por serem os meus companheiros de energias, o Radares por ser o estudante mais honesto do mundo, o Chaveiro e o George por me acolherem nas suas residências sempre que lá fora estava friozinho. Ao pissingz por ser o meu ídolo. Ao G3 por me fazer acreditar que tudo é possível. Ao michael e ao priskas por me fazerem parecer menos estúpido à beira deles.

Rafael Cavalheiro

*“Once you make it, to your point of making it
you’ll appreciate the struggle”*

Nas

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Motivação	4
1.3	Objetivos	4
1.4	Estrutura da dissertação	5
2	Revisão Bibliográfica	7
2.1	Perdas nas Redes de Distribuição	7
2.1.1	Classificação das Perdas	7
2.1.2	Principais Causas das Perdas	9
2.1.3	Estratégias de Redução de Perdas	12
2.2	Desequilíbrio Trifásico	15
2.2.1	Definição	15
2.2.2	Quantificação	15
2.2.3	Causas do Desequilíbrio	17
3	Metodologia	19
3.1	Descrição Geral da Metodologia	19
3.2	Rede BT	20
3.3	Ferramenta de Simulação	21
4	Resultados	23
4.1	Impacto do Desequilíbrio Trifásico	23
4.1.1	Quantificação do Desequilíbrio	24
4.1.2	Perdas	26
4.2	Impacto do Desequilíbrio Trifásico Numa Rede BT Real	29
4.2.1	Impacto da Iluminação Pública	31
4.2.2	Impacto da Produção Dispersa	34
5	Conclusões e Trabalho Futuro	37
5.1	Conclusões	37
5.2	Trabalho Futuro	38
	Referências	39

Lista de Figuras

1.1	Evolução temporal do consumo de energia elétrica em Portugal (kWh). [1]	1
1.2	Evolução temporal de fornecimento de energia e das perdas na rede de distribuição em Portugal. [2]	2
1.3	Visualização gráfica da evolução temporal do fornecimento de energia e das perdas na rede de distribuição em Portugal. [2]	3
2.1	Esquema equivalente do modelo em pi de uma linha de transmissão	9
2.2	Triângulo de potência. Adaptada de [3]	11
2.3	Triângulo de potência. Adaptada de [3]	11
2.4	Representação gráfica dos três sistemas de tensões.	16
2.5	Construção gráfica dos valores de tensão por fase a partir dos três sistemas de tensões	17
3.1	Arquitetura da Rede BT	21
4.1	Variação das perdas com o desequilíbrio trifásico para a rede de 6 kVA	28
4.2	Variação das perdas com o desequilíbrio trifásico para a rede de 18 kVA	28
4.3	Variação das perdas com o desequilíbrio trifásico para a rede de 180 kVA	29
4.4	Diagrama de cargas trifásico de uma rede BT real	29
4.5	Nível de desequilíbrio das cargas da rede BT real	30
4.6	Diagrama de cargas trifásico de uma rede BT real equilibrada	31
4.7	Diagramas de cargas com IP distribuída pelas três fases	32
4.8	Diagramas de cargas com IP incluída na fase L1	32
4.9	Diagramas de cargas com IP incluída na fase L2	33
4.10	Diagramas de cargas com IP incluída na fase L3	33
4.11	Diagramas de cargas com PD instalada na fase L1	35
4.12	Diagramas de cargas com PD instalada na fase L2	35
4.13	Diagramas de cargas com PD instalada na fase L3	36

Lista de Tabelas

4.1	Distribuição das cargas na rede 6 kVA	23
4.2	Distribuição das cargas na rede 18 kVA	24
4.3	Distribuição das cargas na rede 180 kVA	24
4.4	Quantificação do desequilíbrio trifásico na rede 6 kVA	25
4.5	Quantificação do desequilíbrio trifásico na rede 18 kVA	25
4.6	Quantificação do desequilíbrio trifásico na rede 180 kVA	26
4.7	Perdas na rede 6 kVA	26
4.8	Perdas na rede 18 kVA	27
4.9	Perdas na rede 180 kVA	27
4.10	Impacto do desequilíbrio trifásico nas perdas da rede BT real	31
4.11	Impacto da IP nas perdas da rede BT real	34
4.12	Impacto da PD nas perdas da rede real BT	36

Abreviaturas e Símbolos

AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
GWh	Gigawatt-hora
I	Corrente Elétrica
IP	Iluminação Pública
kV	Kilovolt
kVA	Kilovolt-ampere
kW	Kilowatt
kWh	kilowatt-hora
MAT	Muito Alta Tensão
MT	Média Tensão
Mvar	Megavolt-ampere reativo
MW	Megawatt
PD	Produção Dispersa
R	Resistência Elétrica
SEE	Sistema Elétrico de Energia
SVC	Static Var Controller

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Desde finais do século XIX, altura em que foram desenvolvidos os primeiros sistemas de distribuição de energia elétrica, assistiu-se a uma crescente dependência da energia elétrica por parte da sociedade, até que, atualmente, a eletricidade é praticamente considerada um "bem de primeira necessidade". Inclusivamente, em Portugal, foram tomadas medidas como o Decreto-Lei nº 138-A/2010 [4] de forma a garantir o acesso ao serviço essencial de fornecimento de energia elétrica a famílias de carência socioeconómica. A energia elétrica teve um papel de extrema relevância para o desenvolvimento tecnológico, revolucionando a indústria e moldando a sociedade como a conhecemos atualmente. No seguinte gráfico é possível observar a evolução de consumo de energia elétrica em Portugal nos últimos anos expresso em kWh.

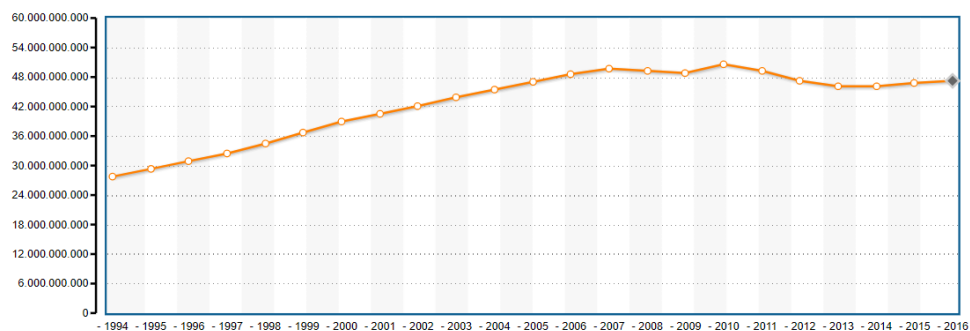


Figura 1.1: Evolução temporal do consumo de energia elétrica em Portugal (kWh). [1]

No gráfico é possível observar a crescente procura energética verificada nas últimas décadas. Apesar deste crescimento nas últimas décadas, nos últimos anos experienciou-se um decréscimo no consumo de energia em Portugal, que se deve por um lado à crise socioeconómica, e por outro lado ao crescente aumento de instalações de autoconsumo. Aliada à forte procura energética verificada, vem a capacidade de produção, transporte e distribuição apresentada pelo Sistema Elétrico de Energia (SEE), tendo este sido alvo de estudo e investimento de modo a ser capaz de entregar

a energia procurada pelos consumidores, mantendo os níveis de segurança e qualidade de serviço esperados, tentando ao mesmo tempo melhorar os seus níveis de eficiência. De forma a assegurar o cumprimento destes requisitos, em Portugal é comum a empresa distribuidora, EDP Distribuição, estabelecer um plano de desenvolvimento e investimento da rede de distribuição (PDIRD)[5].

Os níveis de eficiência da rede podem ser aumentados, sobretudo recorrendo à diminuição das perdas inerentes aos processos envolvidos na rede de distribuição. Estas perdas traduzem um custo monetário elevado para a empresa distribuidora e, conseqüentemente, para os consumidores, visto que as perdas são incluídas nas tarifas. Nas seguintes figuras, pode-se observar a evolução dos níveis de fornecimento de energia elétrica e de perdas na rede de distribuição nos últimos anos.

	Perdas <i>Losses</i>	Fornecimentos energia e eléctrica (exclui MAT) <i>Electricity supply (VHV excluded)</i>	Taxa de perdas <i>Losses rate</i>
	(GWh)	(GW h)	(%)
1997	2.570	28.032	9,2
1998	2.757	29.645	9,3
1999	2.758	31.538	8,7
2000	2.877	33.548	8,8
2001	3.191	35.248	9,1
2002	2.948	36.058	8,2
2003	3.258	37.842	8,8
2004	3.451	40.094	8,8
2005	3.439	42.495	8,1
2006	3.168	44.042	7,2
2007	3.498	44.481	7,9
2008	3.633	44.802	8,1
2009	3.277	44.608	7,3
2010	3.778	46.312	8,2
2011	3.484	44.734	7,7
2012	3.904	42.754	9,1
2013	4.687	41.783	11,2
2014	4.302	41.698	10,3
2015	4.114	42.104	9,8

Figura 1.2: Evolução temporal de fornecimento de energia e das perdas na rede de distribuição em Portugal. [2]

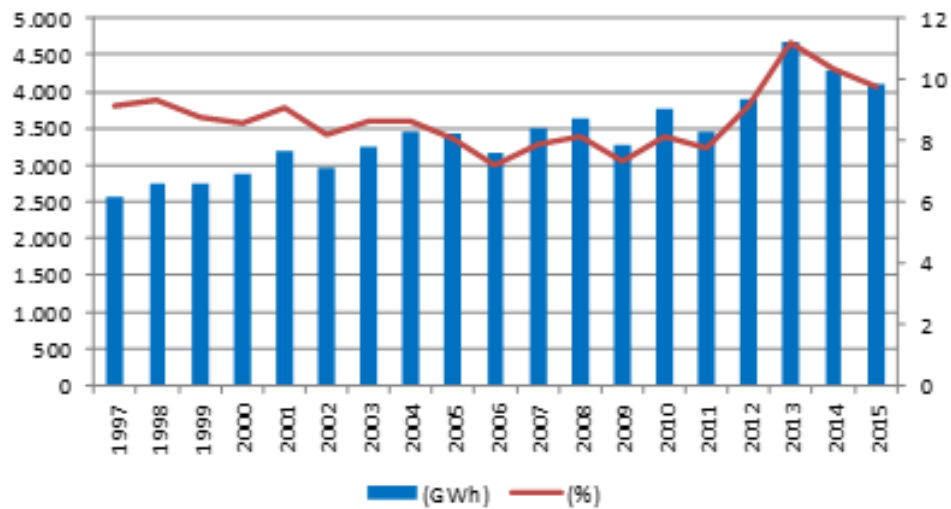


Figura 1.3: Visualização gráfica da evolução temporal do fornecimento de energia e das perdas na rede de distribuição em Portugal. [2]

Pelas razões referidas anteriormente, a diminuição das perdas sempre foi uma preocupação tida em conta pelas empresas de distribuição de energia. Nas últimas décadas, assistiu-se a uma reestruturação do setor elétrico marcada pela maior liberalização do mesmo, pelo que, esta preocupação ganhou uma relevância de dimensão maior, visto que as empresas de distribuição que eram controladas pelo Estado passaram a ser empresas privadas. Estas empresas pretendem maximizar as suas margens de lucro, apostando na otimização da exploração da rede e na diminuição dos custos associados.

A aposta em estratégias de redução de perdas requiere um certo investimento por parte do operador da rede. De forma a influenciar as empresas distribuidoras a rumarem nessa direção, o Sistema Tarifário Português estabelece um mecanismo de incentivo à redução de perdas nas redes de distribuição. Este mecanismo [6], inserido numa política de limites de proveitos, beneficia o operador da rede com uma remuneração adicional, caso este consiga reduzir as perdas nas suas redes abaixo de um valor referenciado pela ERSE. Caso o operador da rede apresente perdas superiores ao valor de referência, é penalizado.

Uma das dificuldades encontradas na exploração de redes de distribuição BT prende-se com a presença de cargas monofásicas, que dificilmente serão distribuídas equitativamente pelas três fases. Este desequilíbrio das cargas gera, consequentemente, desequilíbrios de tensão no sistema, mesmo quando a tensão no posto de transformação é equilibrada. Os desequilíbrios de tensão, além de afetarem a qualidade de energia, podem reduzir a eficiência ou até danificar equipamentos do sistema, como por exemplo os motores, que são equipamentos bastante sensíveis a estes desequilíbrios. Além disso, a existência destes desequilíbrios aumenta o risco de sobrecarga de uma fase, que terá um valor maior do que teria no caso de se estar perante um sistema equilibrado. Por sua vez, a ocorrência de sobrecarga de uma fase, poderá levar ao sobreaquecimento dos cabos condutores, reduzindo o seu tempo de vida útil ou até danificando os mesmos. Estes desequilíbrios

de tensão, geram também correntes bastante elevadas no neutro, podendo levar ao disparo dos diferenciais e demais proteções. Além destes inconvenientes referidos anteriormente, o principal problema associado ao desequilíbrio trifásico é o aumento das perdas de energia elétrica na rede.

1.2 Motivação

Como foi referido anteriormente, o consumo energético tem aumentado nas últimas décadas, e prevê-se que este crescimento se mantenha no futuro. Deste modo, é importante otimizar o processo de fornecimento de energia aos consumidores, ou seja, diminuir ao máximo a diferença entre a energia produzida e a energia entregue aos consumidores. É possível constatar que a maioria das perdas verificadas no SEE, encontram-se nas redes de distribuição. Assim, torna-se imperativo para as empresas distribuidoras adoptarem estratégias de diminuição de perdas, de modo a reduzir os custos associados à atividade de distribuição de energia. Vários estudos foram realizados de forma a caracterizar as perdas nas redes de distribuição, para um melhor entendimento sobre como diminuir as mesmas. Como foi referido anteriormente, um dos problemas que afeta as perdas nas redes de distribuição BT é o facto de o sistema se apresentar com uma distribuição de cargas desequilibrada, que leva ao aparecimento de desequilíbrios de tensão. Porém, não foram encontrados estudos sobre perdas de energia associadas ao desequilíbrio trifásico, embora não seja desconhecido o facto deste ter impacto nas perdas. Este estudo surge, então, de forma a entender melhor qual o verdadeiro impacto do desequilíbrio trifásico nas perdas das redes de distribuição BT. Além disso, a análise é baseada em dados reais, nomeadamente, dados sobre desequilíbrios trifásicos, informação esta que é extremamente rara.

1.3 Objetivos

O foco primordial deste trabalho reflete-se em estudar e analisar o impacto do desequilíbrio trifásico nas perdas de uma rede de distribuição BT. Nessa perspetiva, apresentam-se os seguintes tópicos que resumem os objetivos a atingir nesta dissertação:

- Estudar o potencial impacto do desequilíbrio trifásico nas perdas de uma rede de teste de distribuição BT;
- Estudar o impacto do desequilíbrio trifásico numa rede de distribuição BT real;
- Analisar o impacto da iluminação pública nas perdas de uma rede de distribuição BT real;
- Analisar o impacto da integração de produção dispersa nas perdas de uma rede de distribuição BT real.

1.4 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos. No capítulo 1, é realizada uma breve contextualização sobre o tema em estudo, assim como são apresentados a motivação que expõe o interesse neste estudo e os objetivos que pretende atingir.

No capítulo 2, são discutidos alguns conceitos sobre perdas em redes distribuição, como a classificação e principais causas das mesmas. São também apresentadas algumas estratégias de redução de perdas. Outro conceito abordado é o desequilíbrio trifásico, apresentando a sua definição, quantificação e causas do mesmo.

No capítulo 3 é descrita sucintamente a metodologia adotada no presente estudo, assim como a ferramenta de simulação e a rede de distribuição BT usada nas simulações efetuadas.

No capítulo 4, encontram-se expostos os resultados das simulações efetuadas, assim como uma breve análise aos mesmos.

Por último, no capítulo 5, apresentam-se as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Perdas nas Redes de Distribuição

Na exploração do Sistema Elétrico de Energia (SEE) existem perdas associadas aos processos de produção, de transporte e de distribuição da energia, sendo estas impossíveis de erradicar. Assim, torna-se imperativo haver uma otimização nos processos envolvidos na exploração do SEE, por forma a minimizar o valor das perdas. O foco deste trabalho incide apenas nas perdas existentes nas redes de distribuição, em particular nas redes BT.

As perdas, como o próprio nome indica, representam energia desperdiçada que não será comercializada, afetando assim o lucro da empresa distribuidora. Quanto menor for o valor das perdas, maior será o lucro da empresa, o que também beneficiará o consumidor com a redução da fatura energética e com a melhoria da qualidade de serviço prestado pela empresa distribuidora.

As perdas nas redes de distribuição podem ser definidas como a diferença entre a energia total entregue pelo sistema de transmissão ao sistema distribuidor e a energia que é efetivamente comercializada. Estas podem ter origem e natureza diversas, sendo assim importante caracterizar as perdas pelos vários equipamentos do SEE e identificar os vários fatores que provocam as perdas no sistema [7], [8].

2.1.1 Classificação das Perdas

A classificação das perdas que ocorrem nas redes do SEE é feita consoante a natureza e origem das mesmas. Quanto à sua natureza, as perdas podem ser divididas em dois grupos: perdas de potência e perdas de energia. Relativamente à sua origem, estas podem ser classificadas como perdas técnicas ou perdas não técnicas.

2.1.1.1 Potência de Perdas

A potência de perdas exprime o valor instantâneo da diferença entre a potência injetada na rede e a potência fornecida aos consumidores, num dado instante de tempo t .

$$P(t) = P(t)_{entrada} - P(t)_{saida} \quad [kW] \quad (2.1)$$

2.1.1.2 Energia de Perdas

A energia de perdas corresponde à diferença entre a energia requerida e a energia consumida, num dado intervalo de tempo Δt .

$$E(\Delta t) = E(\Delta t)_{entrada} - E(\Delta t)_{saida} \quad [kWh] \quad (2.2)$$

2.1.1.3 Perdas Técnicas

As perdas técnicas traduzem as perdas que ocorrem devido a fenómenos físicos envolvidos nos processos de transporte e distribuição da energia elétrica desde as centrais de produção até aos consumidores finais, sejam estes consumidores BT, MT ou AT. Durante estes processos, parte da energia é dissipada principalmente devido às perdas por efeito de Joule nas linhas de transmissão e às perdas no cobre e no ferro dos núcleos magnéticos dos transformadores. Outras perdas que poderiam ser consideradas, mas no caso das redes de distribuição geralmente se tornam irrelevantes, seriam as perdas por efeito de coroa.[9]

As perdas técnicas ocorrem em diversos equipamentos elétricos do SEE e podem ser divididas em dois grupos: perdas ativas e perdas reativas.

As perdas ativas, normalmente, representam a maior parte das perdas técnicas e traduzem a energia dissipada por efeito de Joule nos condutores das linhas de transmissão. Estas são proporcionais ao quadrado da corrente que atravessa o condutor e à sua resistência elétrica, sendo expressas por:

$$P = R \times I^2 \quad (2.3)$$

Em que:

- P é a potência de perdas ativas;
- R é a resistência elétrica;
- I é a corrente elétrica.

As perdas reativas ocorrem nas reatâncias dos equipamentos do SEE. Nos sistemas de transmissão de corrente alternada, a energia é armazenada nas reatâncias num primeiro ciclo e devolvida ao sistema meio ciclo depois, assim a energia reativa não é efetivamente perdida, não contribuindo para as perdas ativas de uma forma direta. No entanto, este processo provoca um aumento de corrente nas linhas, contribuindo indiretamente para o aumento das perdas.

2.1.1.4 Perdas Não Técnicas

As perdas não técnicas ou perdas comerciais podem ser calculadas pela diferença entre as perdas totais e as perdas técnicas. Este tipo de perdas não se deve a fenômenos físicos envolvidos na operação do SEE, mas sim à energia que é entregue aos consumidores e que não foi faturada [10]. Isto pode acontecer devido a vários fatores, como:

- Erros de medição;
- Erros de ligação;
- Desvio antes da medição;
- Fraude nos equipamentos de medição;
- Furto de energia.

2.1.2 Principais Causas das Perdas

O sistema de transmissão do SEE é composto pelas linhas de transporte e distribuição, cuja função é fazer chegar a energia produzida nas grandes centrais aos consumidores finais. As linhas de transmissão são responsáveis pela grande parte das perdas ocorridas no sistema, sendo assim importante entender como as linhas são modelizadas, antes de analisar quais os principais fatores que influenciam as perdas ativas do sistema.

Uma linha de transmissão é modelizada com base em três parâmetros: resistência R , reactância X e admitância Y . O parâmetro da linha que tem maior influência nas perdas ativas é a resistência elétrica R , pois estas são proporcionais a RI^2 . [11]

Na figura seguinte encontra-se representado o esquema equivalente em π .

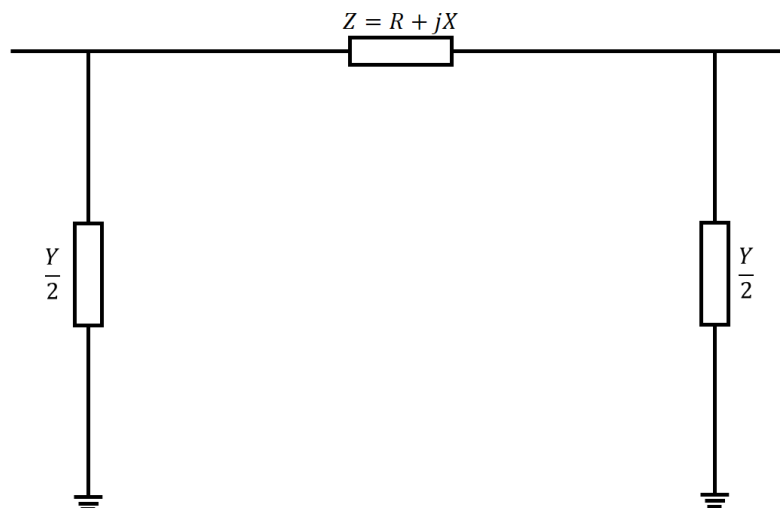


Figura 2.1: Esquema equivalente do modelo em pi de uma linha de transmissão

2.1.2.1 Resistência Elétrica

A resistência elétrica de uma linha é proporcional à resistividade elétrica do material do condutor (ρ) e ao seu comprimento (l), e inversamente proporcional à secção útil do condutor (A) [12], como se pode verificar na seguinte expressão:

$$R = \frac{\rho \times l}{A} \quad (2.4)$$

A resistividade depende do material do condutor, sendo normalmente usados cabos de cobre ou alumínio. Embora a resistividade do cobre seja mais reduzida do que a do alumínio, o alumínio é um material que apresenta menor custo, cabendo à empresa distribuidora analisar o impacto financeiro da escolha do material condutor para as linhas de transmissão. Como a resistência elétrica é proporcional ao comprimento do condutor, quanto maior for a linha maior é a resistência à passagem de corrente elétrica. Por sua vez, um condutor com uma secção útil maior apresentará uma menor resistência à passagem de corrente, e maior será a capacidade de transporte da linha. [13]

Como foi referido anteriormente, as perdas do sistema são proporcionais à resistência e ao quadrado da corrente, assim é de fácil compreensão que quanto maior for a resistência elétrica das linhas de transmissão maiores serão as perdas.

2.1.2.2 Fator de Potência

A potência ativa transmitida numa linha é dada por:

$$P = VI \times \cos(\phi) \quad (2.5)$$

Em que:

- P é a potência ativa transmitida numa linha (W);
- V é o valor eficaz da tensão (V);
- I é o valor eficaz da intensidade da corrente (A);
- $\cos(\phi)$ é o fator de potência;
- ϕ é o ângulo entre a tensão e a corrente.

O fator de potência (FP) traduz a relação entre a potência ativa e a potência aparente de uma carga e, conseqüentemente, o fluxo de potência reativa. Na figura seguinte, encontra-se representada a relação entre a potência aparente (S), ativa (P) e reativa (Q).

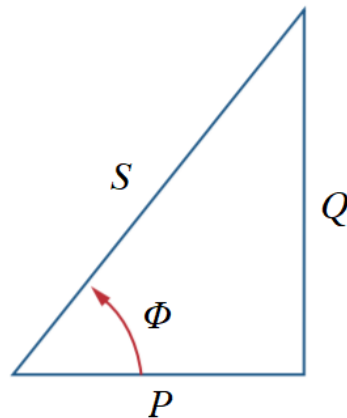


Figura 2.2: Triângulo de potência. Adaptada de [3]

O fator de potência de uma carga pode variar entre 0 e 1. Quando o FP é nulo, a carga pode ser puramente indutiva ou puramente capacitiva, o que significa que a tensão da carga relativamente à corrente está atrasada ($\phi = -90^\circ$) ou adiantada ($\phi = 90^\circ$), respetivamente. Quando o FP é igual a 1, a carga é puramente resistiva, o que significa que a tensão está em fase com a corrente ($\phi = 0^\circ$).

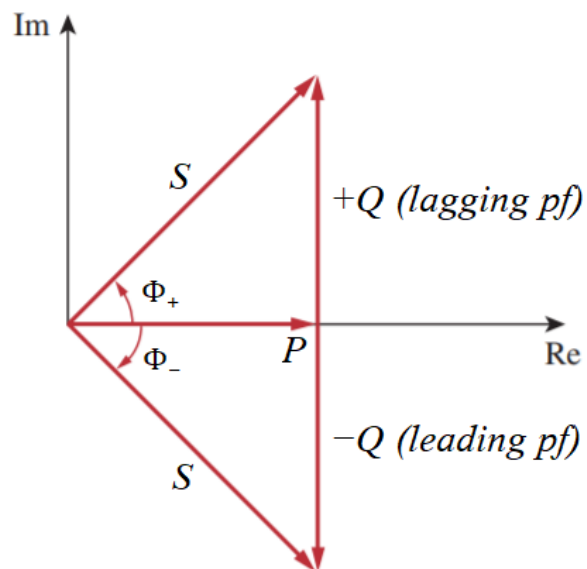


Figura 2.3: Triângulo de potência. Adaptada de [3]

Analisando a expressão $P = VI \cos \phi$, verifica-se que para a mesma potência ativa (P), a diminuição do FP traduz-se num aumento da corrente que alimenta a carga e, conseqüentemente, num aumento das perdas por efeito de joule nos condutores das linhas. Por outro lado, o aumento do FP traduz-se numa diminuição do fluxo de potência reativa, contribuindo para a redução das perdas

na rede.

2.1.2.3 Tensão Elétrica

A potência elétrica transmitida na rede é igual ao produto da tensão pela corrente, como já foi referido anteriormente. Assim, para um dado valor de potência, o aumento do nível de tensão reduz a corrente que circula nas linhas, o que por sua vez contribui para a diminuição das perdas na rede. Este é o principal motivo pelo qual o transporte de energia no SEE é feito em níveis de tensão elevados. Porém, por uma questão de segurança das pessoas e equipamentos elétricos do SEE, o aumento do nível de tensão das linhas requer mais cuidados ao nível do isolamento.

2.1.3 Estratégias de Redução de Perdas

Após a análise feita anteriormente, é possível constatar a extrema importância da minimização das perdas nas redes de distribuição. Assim, compete à empresa distribuidora encontrar estratégias que permitam a redução das perdas no sistema, melhorando a eficiência da rede e reduzindo a diferença entre a energia emitida e a energia faturada.

De seguida serão apresentadas algumas estratégias de redução de perdas tipicamente adotadas por empresas distribuidoras, sendo de realçar que cabe a estas empresas realizar um estudo económico com intuito de averiguar a rentabilidade do investimento na implementação destas estratégias em relação ao custo das perdas na rede, isto é, encontrar o ponto que otimiza a relação entre o custo da redução das perdas e o valor económico real das perdas.

2.1.3.1 Reforço das Linhas

Como foi dito anteriormente, o tipo de perdas que mais contribui para as perdas totais do sistema são as perdas por efeito de Joule que ocorrem nas linhas de transmissão. Assim, uma estratégia de redução de perdas é através da substituição dos condutores existentes por outros com menor resistência.

A estratégia passa por identificar através de simulações quais as linhas que mais contribuem para as perdas do sistema. Nesta perspetiva, pode também identificar-se quais as linhas mais carregadas, visto que as perdas são diretamente proporcionais ao quadrado da corrente ($P = RI^2$). Outra possibilidade passa pela análise das linhas mais antigas, visto que estas se encontram próximas do seu tempo de fim de vida útil e terão obrigatoriamente de ser substituídas. [14] [15]

Após a identificação destas linhas, as empresas distribuidoras equacionam a substituição destas por outras com melhores características (menor resistividade do material condutor e/ou maior secção útil). A linha substituída, caso não esteja no seu tempo de fim de vida útil, poderá ser reaproveitada para outra ligação. Devido à relação direta das perdas com o quadrado da corrente, outra possibilidade será efetuar derivações, colocando novos cabos em paralelo reduzindo assim a corrente que atravessa os condutores. Porém, isto só é possível caso os apoios estejam aptos para suportar o peso e a tração mecânica acrescida resultantes das novas ligações.

2.1.3.2 Produção Dispersa

O desenvolvimento da produção dispersa (PD) deve-se essencialmente à mudança de paradigma da estrutura hierarquizada do SEE, o qual tradicionalmente possuía um único sentido, desde a produção de energia nas grandes centrais até ao consumidor final, progredindo a partir de níveis de tensão muito alta (MAT – rede de transporte) até tensões mais baixas (BT – rede de distribuição). Com a produção dispersa este esquema tradicional modifica-se aumentando o interesse na ligação de unidades de produção de energia elétrica nas redes de distribuição, nomeadamente em MT e BT, que permanecem próximo do ponto de consumo e é permitido desta forma a troca de energia entre dois níveis de tensão diferentes e em dois sentidos. Este interesse surge devido a políticas ambientais e de sustentabilidade energética, como por exemplo as metas europeias para 2020 e o período de 2020 a 2030, em que se pretende aumentar a eficiência energética em 20% e promover a utilização de energias renováveis, de tal forma que o seu peso no *mix* energético europeu atinja os 20% reduzindo assim a dependência energética do exterior.

Além dos benefícios climáticos promovidos pela redução de 20% nas emissões de gases de efeito de estufa, esta mudança de conceito potencia a redução de investimento na construção de novas instalações ao nível do sistema electroprodutor bem como permite reduzir investimentos ao nível de construção de infraestruturas de rede (linhas, subestações, etc). Esta produção ao estar localizada perto dos centros de consumo permite equacionar o desenvolvimento de novas formas de exploração da rede elétrica, criando zonas com possibilidade de serem alimentadas localmente (aumento da segurança em zonas críticas na sequência de falhas de maior dimensão no sistema elétrico. A instalação de unidades de microgeração próxima dos consumidores implica também uma redução nos fluxos de energia das linhas, reduzindo assim as perdas por efeito de Joule nas mesmas, além de potenciar a melhoria dos perfis de tensão e o descongestionamento dos ramos. [16] [17] [18]

No entanto, a PD não oferece à rede outros serviços que não sejam uma produção não controlada de energia elétrica, não havendo assim de momento qualquer controlo ativo quer local, quer ao nível do operador da rede de distribuição. Este é então um fator que limita consideravelmente a inclusão de PD nas redes de distribuição de BT pois, se em excesso, a PD poderá originar sérios problemas na operação e controlo de redes, originando uma inversão do fluxo de potência que poderá resultar num aumento excessivo das perdas, variações dos níveis de tensão nos barramentos, congestionamento nos ramos da rede, maiores potência de curto-circuito e diminuição da qualidade da onda de tensão ao nível do número de harmónicos. Na Alemanha, nomeadamente, existem estas inversões de fluxos, estando agora a promover o uso de armazenamento (baterias) para permitir uma maior integração de renováveis nas suas redes.

2.1.3.3 Reconfiguração de Redes

Um dos métodos utilizados para minimizar as perdas nas redes de distribuição da energia elétrica é através da reconfiguração das mesmas. O método consiste na alteração da topologia da

rede através da abertura ou fecho dos seccionadores e interruptores por forma a encontrar novos caminhos de canalizar a potência elétrica desde as subestações até aos pontos de consumo.

As redes de distribuição, nomeadamente as redes de BT, são exploradas de forma radial, ou seja, operam sem malhas. Neste tipo de redes, a reconfiguração topológica pode ser realizada através da alteração dos estados das chaves de seccionamento NA (normalmente abertas) e NF (normalmente fechadas), com o objetivo de reduzir as perdas, melhorar os índices de fiabilidade e a eliminação ou isolamento de defeitos. No entanto, é importante referir que, durante o funcionamento normal da rede, as ações de manobra provocam perturbações, como o aparecimento de regimes transitórios que podem provocar instabilidade no sistema, não devendo ser usadas frequentemente.

Para resolver o problema de otimização da reconfiguração das redes, foram desenvolvidos métodos como, por exemplo, os que recorrem à meta-heurística Simulated Annealing (SA) [19], com o objetivo de determinar a melhor reconfiguração topológica através do menor número de manobras possível para reduzir as perdas. Este método trata um problema multicritério (redução das perdas e do número de manobras), o que significa que não existe uma solução ótima, podendo na mesma serem identificadas soluções não dominadas. Outros métodos foram desenvolvidos recorrendo a diferentes algoritmos de otimização, tais como os algoritmos genéticos e meta-heurísticos como em [20], [21] e [22].

Em [23], é proposto um método que trata simultaneamente a reconfiguração de redes com a integração de produção dispersa, com o intuito de otimizar a redução de perdas e melhorar os perfis de tensão, eficiência energética e nivelamento das cargas.

2.1.3.4 Compensação da Energia Reativa

A maioria dos equipamentos elétricos do SEE, para funcionarem, necessitam de energia ativa e reativa. Enquanto a energia ativa é a componente que realiza trabalho, a energia reativa produz um campo eletromagnético que é fundamental para o correto funcionamento de equipamentos como os motores e os transformadores. No entanto, o fluxo de energia reativa provoca um aumento na magnitude da corrente que percorre os condutores, contribuindo assim para um aumento das perdas por efeito de Joule. Além disso, o fluxo de potência de reativa reduz o fator de potência que transita na rede, limitando a capacidade de transmissão das linhas. Assim, através da compensação de energia reativa e correção do fator de potência, consegue-se um aumento de potência ativa disponível, redução das perdas por efeito de Joule e diminuição das quedas de tensão ao longo das linhas, o que contribui para um aumento da estabilidade do sistema.

O método mais económico para proceder à compensação da energia reativa é através da instalação de baterias de condensadores, que tem o benefício de poder ser realizado em qualquer ponto da rede, quer nas centrais de geração quer junto às cargas, sendo a última a melhor opção visto que evita o trânsito de potência reativa nas linhas.

De modo a otimizar o processo da compensação local da reativa, foram desenvolvidos alguns métodos que permitem determinar qual a melhor localização para a instalação das baterias de condensadores. Em [24] foi proposta uma técnica que se baseia na utilização de métodos, a análise de

sensibilidade e o Gravitational Search Algorithm (GSA). Para determinar possíveis localizações para a compensação local, usam-se Loss Sensivity Factor's (LSFs), enquanto o GSA determina as configurações das baterias de condensadores a serem instaladas em cada local. Outros métodos recorrem a algoritmos diferentes para a otimização da compensação reativa como o Teaching Learning Based Optimization (TLBO) [25] e o Bacterial Foraging Optimization Algorithm (BFOA) [26].

Atualmente existem tecnologias mais recentes baseadas em Eletrônica de Potência (FACTS) para a compensação de energia reativa. Os SVC (Static Var Compensator) e o STATCOM, para além da compensação de energia reativa, permitem a compensação de flutuações e oscos de tensão entre outros distúrbios dinâmicos ocorridos na rede de distribuição, devido a apresentarem um poder de reação muito rápido. No entanto, a utilização das FACTS para a compensação da potência reativa tem a desvantagem de tornar a exploração da rede mais dispendiosa, quando comparada com a utilização de baterias de condensadores.

Com a crescente penetração da PD nas redes de distribuição, existe agora a possibilidade de controlar a energia reativa através do controlo de excitação dos geradores síncronos ou por atuação nas interfaces de eletrônica de potência que fazem o acoplamento dos geradores com a rede. [9] (referencia vladimiro)

2.2 Desequilíbrio Trifásico

2.2.1 Definição

Um sistema trifásico é considerado equilibrado ou simétrico se as correntes e tensões de cada fase tiveram a mesma amplitude e estiverem desfasadas 120° uma das outras. Se uma destas duas condições não se verificarem o sistema é considerado desequilibrado.

Este tema será abordado admitindo que as formas de onda são sinusoidais e, portanto, não contêm harmónicos.

2.2.2 Quantificação

Para quantificar o desequilíbrio de tensão ou de corrente de um sistema trifásico, é usado o Teorema de Fortescue. Este teorema demonstra-se que qualquer sistema trifásico assimétrico pode decompor-se numa soma de três sistemas trifásicos simétricos, denominados componentes simétricas, com os nomes de sistema direto, sistema inverso e sistema homopolar.

As componentes simétricas são calculadas através de transformações matriciais dos fasores trifásicos de corrente ou tensão. Os índices u, v e w são usados para identificar as 3 fases enquanto os índices h, d e i referem-se à componente homopolar, direta e inversa, respetivamente. As

expressões seguintes são formuladas para uma tensão U , é claro que, do mesmo modo que para as tensões, pode definir-se uma decomposição em componentes simétricas para as correntes:

$$\begin{bmatrix} U_h \\ U_d \\ U_i \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_u \\ U_v \\ U_w \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Onde $\alpha = e^{j120^\circ}$ representa o defasamento de 120° entre as tensões das três fases.

Estas transformações são invariantes quanto à energia, assim o cálculo da potência usando quer os valores originais quer os valores da transformada irão ter o mesmo resultado.

A transformada inversa é:

$$\begin{bmatrix} U_u \\ U_v \\ U_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_h \\ U_d \\ U_i \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Na seguinte figura encontra-se a representação gráfica dos três sistemas de tensões, direto, inverso e homopolar.

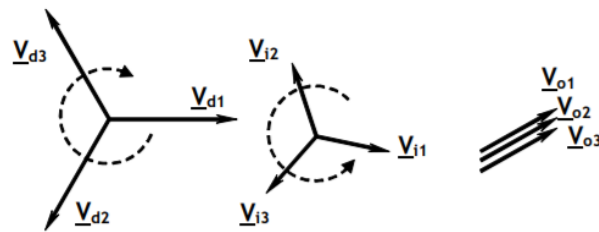


Figura 2.4: Representação gráfica dos três sistemas de tensões.

Na figura seguinte encontra-se a construção gráfica dos valores de tensão por fase a partir dos sistemas direto, inverso e homopolar.

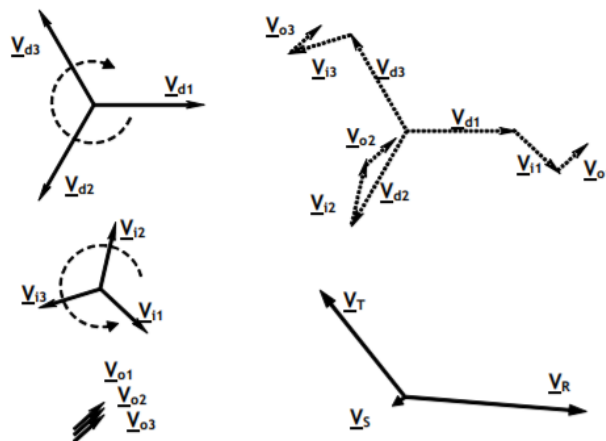


Figura 2.5: Construção gráfica dos valores de tensão por fase a partir dos três sistemas de tensões

Justifica-se, pois, que o segundo terno de tensões seja chamado inverso, pois a sequência das fases está invertida em relação ao primeiro, o sistema direto. O sistema homopolar (como o nome indica) é constituído por um terno de tensões todas iguais em módulo e fase.

Assim, uma maneira de quantificar o desequilíbrio trifásico (em %) é através das razões u_U e u_I entre as magnitudes das componentes diretas e inversas:

$$u_U = \frac{U_i}{U_d} \cdot 100\% \quad (2.8)$$

Em que:

- U_i corresponde à magnitude da componente inversa do sistema;
- U_d corresponde à magnitude da componente direta do sistema.

Este tipo de quantificação do desequilíbrio trifásico é usado em normas respetivas à qualidade da energia como as normas europeias EN-50160 e IEC 6100-3-2, de modo a limitar o desequilíbrio em (2.8) $< 2\%$ para redes MT e BT, e em (2.8) $< 1\%$ para redes AT.

2.2.3 Causas do Desequilíbrio

Nas grandes centrais de produção, as tensões do sistema são altamente simétricas devido à construção e operação dos geradores síncronos usados nestas centrais. Assim, em termos gerais, a produção de energia centralizada não contribui para o desequilíbrio do sistema. No entanto, a produção dispersa tem-se tornado cada vez mais popular representando uma percentagem significativa da produção de energia elétrica e, neste caso, a situação é diferente. Muitas das pequenas unidades de produção dispersa, como as instalações fotovoltaicas, são conectadas à rede BT através de inversores monofásicos. Assim, a potência elétrica é injetada numa só fase o que contribui para o aumento do desequilíbrio trifásico do sistema.

As redes elétricas MT e AT são redes tipicamente simétricas no que diz respeito à distribuição das cargas, já que a grande maioria das cargas encontradas nestes tipos de redes são cargas trifásicas. Nas redes BT, isto já não se verifica, como a grande maioria das cargas são monofásicas, há uma dificuldade acrescida em realizar uma distribuição simétrica das cargas. A grande causa do desequilíbrio trifásico deve-se ao facto de as cargas monofásicas não serem distribuídas equitativamente pelas três fases e, mesmo que o fossem, seriam apenas num dado instante de tempo já que variam de forma estocástica. A iluminação pública, por exemplo, representa uma carga considerável nas redes BT e se não for devidamente distribuída pelas três fases, pode causar um aumento do desequilíbrio do sistema. Assim, convém que a empresa distribuidora realize uma análise à distribuição de cargas nas redes BT antes de proceder à instalação de postes de iluminação pública.

A sazonalidade das cargas monofásicas das redes BT é outro fator que influencia muito o desequilíbrio, pois mesmo que a uma dada altura do ano as cargas se encontrem equilibradas, a sazonalidade das mesmas faz com que, em diferentes períodos do ano, estas se encontrem desequilibradas.

Futuramente, os veículos elétricos podem também ter um impacto negativo no desequilíbrio trifásico das redes BT, visto que os postos de carregamento monofásicos podem representar uma carga considerável no sistema trifásico.

Capítulo 3

Metodologia

Neste capítulo apresenta-se a descrição da metodologia adotada para a resolução do caso de estudo, assim como uma sucinta descrição da estrutura da rede BT estudada e uma apresentação da ferramenta de simulação utilizada.

3.1 Descrição Geral da Metodologia

O estudo do problema em questão é baseado em simulações de uma rede BT real exposta a diferentes cenários de exploração. Inicialmente, fez-se um estudo através de simulações dessa rede sobre o potencial impacto do desequilíbrio das cargas nas perdas da rede. De seguida são apresentados os passos adotados nesta fase inicial do estudo:

- Seleção dos diferentes níveis de carga a estudar;
- Seleção dos diferentes níveis de desequilíbrio para cada nível de carga a estudar;
- Desenvolvimento de uma fórmula para quantificar o desequilíbrio de cada cenário;
- Realização do trânsito de potências para cada cenário;
- Recolha e tratamento de dados com vista ao cálculo das perdas nas diferentes condições de exploração.

Como dito anteriormente, com este estudo inicial pretendeu-se adquirir uma ideia geral sobre o potencial impacto do desequilíbrio das cargas nas perdas da rede. Assim, para um dado nível de carga, impôs-se vários níveis de desequilíbrio e realizou-se o trânsito de potências para cada um desses cenários, calculando-se as perdas para cada um deles. Este processo foi repetido para os diferentes níveis de carga estudados.

Posteriormente, realizou-se um estudo através de simulações da rede usada no estudo anterior com as potências ativas reais dessa mesma rede, o que se revela extremamente importante visto estes diagramas de carga traduzem o desequilíbrio real existente na rede. De seguida são apresentados os passos fundamentais desta fase do estudo:

- Recolha de dados respetivos a diagramas de carga do ano de 2017 de uma determinada rede BT;
- Escolha de um diagrama de carga respetivo a uma determinada semana dos dados recolhidos;
- Determinação do desequilíbrio das cargas recorrendo à fórmula matemática anteriormente desenvolvida;
- Identificação de vários cenários diferentes de exploração;
- Realização do trânsito de potências para cada cenário;
- Recolha e tratamento de dados com vista ao cálculo das perdas nas diferentes condições de exploração.

Nesta fase do estudo começou-se por realizar o trânsito de potências da rede real com os dados reais das cargas desequilibradas. De seguida, equilibraram-se as cargas e realizou-se novamente o trânsito de potências. Este processo foi repetido para vários cenários diferentes de exploração da rede, incluindo assim na rede dados relativos à produção dispersa e à iluminação pública.

Relativamente à inclusão da produção dispersa, recorreu-se a um diagrama real de produção solar obtido na zona da rede BT em questão. Em primeiro lugar, procedeu-se à identificação das fases mais e menos carregadas. De seguida fizeram-se 3 simulações, instalando as unidades fotovoltaicas nas três fases distintas, realizando o trânsito de potências para cada um desses casos.

Quanto à iluminação pública, recorreu-se a um perfil regulamentar adotado pela ERSE. Em primeiro lugar, realizou-se uma simulação na qual a IP se encontra distribuída pelas três fases. Seguidamente, fez-se um estudo, identificando as fases mais e menos carregadas e integrando a IP em cada uma das três fases, realizando o trânsito de potências para cada um desses casos.

Depois de realizado o trânsito de potências para cada um dos cenários descritos acima, procedeu-se ao cálculo das perdas dos respetivos cenários.

3.2 Rede BT

Na presente dissertação, para efeitos de reforço da credibilidade do estudo em causa, foi usada uma rede BT real, cujas informações foram fornecidas pela EDP Distribuição, no âmbito do projeto InovGrid desenvolvido em parceria com o INESC Porto. É de realçar a importância dos dados obtidos relativamente à distribuição das cargas pelas três fases, que fornece uma ideia fidedigna e realista do desequilíbrio trifásico presente numa rede BT. Na figura seguinte, ilustra-se o esquema da rede utilizada nos estudos descritos em 3.1:

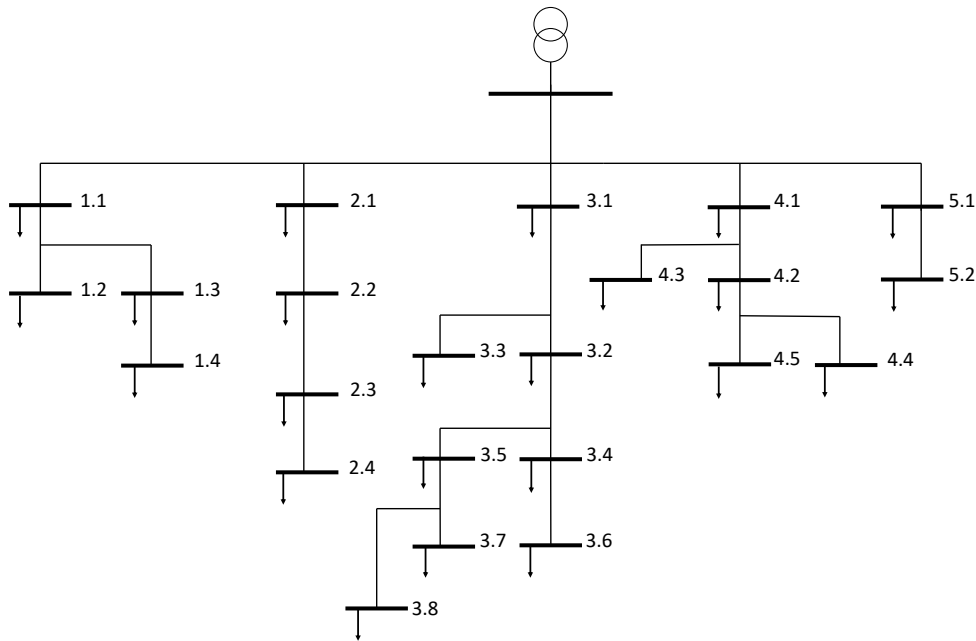


Figura 3.1: Arquitectura da Rede BT

3.3 Ferramenta de Simulação

A premissa base por trás dos estudos descritos no presente capítulo centra-se na realização do trânsito de potência de um sistema trifásico com as cargas desequilibradas. Grande parte dos softwares existentes para a realização de trânsito de potências de sistemas trifásicos cingem-se a sistemas equilibrados, os quais não servem a finalidade do estudo em causa. Assim, optou-se por recorrer a um modelo implementado no Simulink pelo Professor Carlos Moreira, no âmbito da Unidade Curricular Produção Dispersa [27]. O Simulink [28] é uma ferramenta computacional constituída por uma biblioteca de blocos integrada no Matlab, para modelação, simulação e análise dinâmica de sistemas. O seu ambiente gráfico permite a construção de modelos na forma de diagramas de blocos, suportando sistemas lineares e não lineares, modelados em regime contínuo ou discreto.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo serão expostos os resultados obtidos nas diferentes simulações dos estudos de uma rede BT caracterizados no capítulo anterior.

4.1 Impacto do Desequilíbrio Trifásico

Nesta secção irão ser apresentados os resultados de várias simulações sobre o potencial impacto do desequilíbrio trifásico em três redes BT: 6 kVA, 18 kVA e 180 kVA.

Nas tabelas seguintes pode-se observar a distribuição das cargas pelas três fases para os três níveis de carga estudados. O valor das cargas encontram-se representados em kVA.

Tabela 4.1: Distribuição das cargas na rede 6 kVA

Caso	L1	L2	L3
1	2	2	2
2	3	2	1
3	4	2	0
4	5	1	0

Tabela 4.2: Distribuição das cargas na rede 18 kVA

Caso	L1	L2	L3
1	6	6	6
2	7	6	5
3	8	6	4
4	9	6	3
5	10	4	4
6	10	6	2
7	11	4	3
8	11	6	1
9	12	3	3
10	12	6	0
11	13	3	2
12	13	5	0
13	14	2	2
14	14	4	0

Tabela 4.3: Distribuição das cargas na rede 180 kVA

Caso	L1	L2	L3
1	60	60	60
2	80	60	40
3	90	60	30
4	100	40	40
5	100	60	20
6	110	40	30
7	110	60	10
8	120	30	30
9	120	60	0
10	130	30	20

De notar que no estudo da rede de 180 kVA apenas se considerou 10 casos, em vez dos 14 considerados no estudo da rede de 18 kVA, apenas por questões de otimização do estudo.

4.1.1 Quantificação do Desequilíbrio

Depois de escolhida a distribuição das cargas, foi desenvolvida uma fórmula matemática que permite quantificar o desequilíbrio das cargas de cada caso, apresentada de seguida:

$$D(\%) = 1 - [p \cdot \max(\alpha, \beta) + (1 - p) \cdot \min(\alpha, \beta)]^1 \quad (4.1)$$

Em que:

- $\alpha = \frac{L2}{L1}$

¹A razão pela qual se teve de desenvolver esta fórmula para quantificar o desequilíbrio, foi devido à reduzida precisão na obtenção dos dados da reativa, o que os torna pouco fiáveis.

- $\beta = \frac{L3}{L1}$
- $p = 0.45$

De modo a facilitar os cálculos, estabeleceu-se que a fase de referência iria ser, para todos os casos, a fase L1. Assim sendo, a distribuição das cargas pelas três fases foi realizada de modo a que a fase L1 fosse sempre a fase mais carregada. Como é possível observar, os parâmetros α e β representam a relação existente entre as fases L2 e L3, respetivamente, e a fase de referência L1. Determinou-se que se iria aplicar um peso (p) de 45% ao parâmetro de maior valor, e um peso de 55% ao parâmetro de menor valor, de modo a atribuir mais peso à fase mais desequilibrada. Isto, porque quanto maior for o valor de α e β , maior será o equilíbrio entre as fases L2 e L3, respetivamente, e a fase de referência L1. Como já foi referido, os parâmetros utilizados quantificam o equilíbrio entre as três fases, assim sendo, como o objetivo passa por quantificar o desequilíbrio, basta calcular a diferença entre o valor calculado e 1. Nas seguintes tabelas, pode-se observar o valor do desequilíbrio trifásico calculado para cada caso. O valor do desequilíbrio encontra-se expresso em percentagem (%).

Tabela 4.4: Quantificação do desequilíbrio trifásico na rede 6 kVA

Caso	L1	L2	L3	D (%)
1	2	2	2	0
2	3	2	1	52
3	4	2	0	78
4	5	1	0	91

Tabela 4.5: Quantificação do desequilíbrio trifásico na rede 18 kVA

Caso	L1	L2	L3	D (%)
1	6	6	6	0
2	7	6	5	22
3	8	6	4	39
4	9	6	3	52
5	10	4	4	60
6	10	6	2	62
7	11	4	3	69
8	11	6	1	70
9	12	3	3	75
10	12	6	0	78
11	13	3	2	81
12	13	5	0	83
13	14	2	2	86
14	14	4	0	87

Tabela 4.6: Quantificação do desequilíbrio trifásico na rede 180 kVA

Caso	L1	L2	L3	D (%)
1	60	60	60	0 %
2	80	60	40	39 %
3	90	60	30	52 %
4	100	40	40	60 %
5	100	60	20	62 %
6	110	40	30	69 %
7	110	60	10	70 %
8	120	30	30	75 %
9	120	60	0	78 %
10	130	30	20	81 %

4.1.2 Perdas

Depois de quantificado o desequilíbrio trifásico de cada caso em estudo, procedeu-se à simulação das três redes realizando-se o TP e calculando-se as perdas para cada caso das diferentes redes. Nas tabelas seguintes, são apresentados os valores das perdas para cada caso em kW:

Tabela 4.7: Perdas na rede 6 kVA

Caso	L1	L2	L3	D (%)	Perdas
1	2	2	2	0	0,010
2	3	2	1	52	0,013
3	4	2	0	78	0,021
4	5	1	0	91	0,030

Tabela 4.8: Perdas na rede 18 kVA

Caso	L1	L2	L3	D (%)	Perdas
1	6	6	6	0	0,063
2	7	6	5	22	0,066
3	8	6	4	39	0,074
4	9	6	3	52	0,089
5	10	4	4	60	0,097
6	10	6	2	62	0,108
7	11	4	3	69	0,117
8	11	6	1	70	0,134
9	12	3	3	75	0,140
10	12	6	0	78	0,165
11	13	3	2	81	0,169
12	13	5	0	83	0,185
13	14	2	2	86	0,201
14	14	4	0	87	0,212

Tabela 4.9: Perdas na rede 180 kVA

Caso	L1	L2	L3	D (%)	Perdas
1	60	60	60	0 %	6,623
2	80	60	40	39 %	8,275
3	90	60	30	52 %	10,393
4	100	40	40	60 %	12,452
5	100	60	20	62 %	13,472
6	110	40	30	69 %	16,337
7	110	60	10	70 %	17,661
8	120	30	30	75 %	21,678
9	120	60	0	78 %	23,216
10	130	30	20	81 %	29,246

Nos gráficos apresentados de seguida, é possível observar o comportamento das perdas nas três redes estudadas face ao nível de desequilíbrio das cargas.



Figura 4.1: Variação das perdas com o desequilíbrio trifásico para a rede de 6 kVA

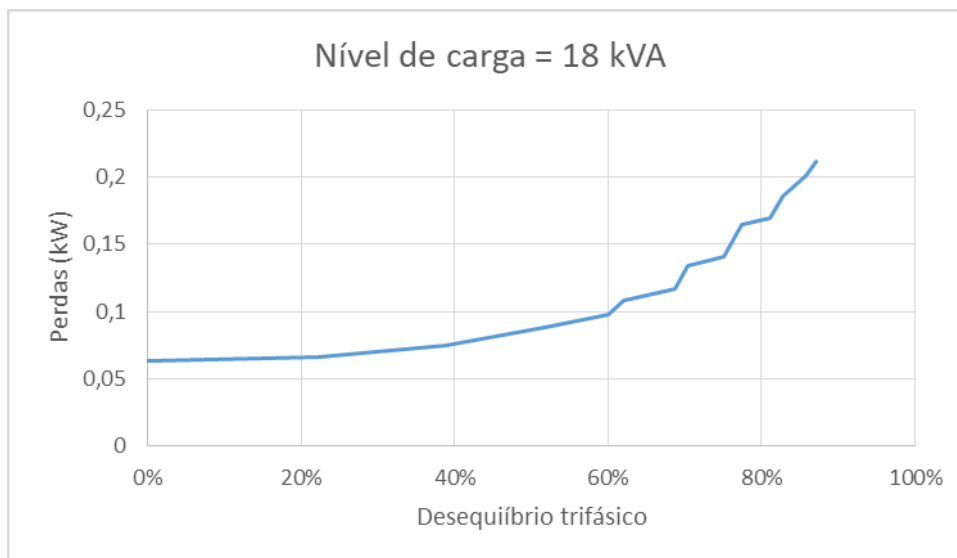


Figura 4.2: Variação das perdas com o desequilíbrio trifásico para a rede de 18 kVA

Como é possível observar nos gráficos acima apresentados, o valor das perdas nas três redes estudadas varia "exponencialmente" com o nível de desequilíbrio das cargas. Pela análise da fórmula 2.3, é de esperar este comportamento, pois se as perdas variam com o quadrado da corrente, um sistema com as cargas desequilibradas contribuirá para um maior valor de perdas visto que este apresentará uma fase mais carregada quando comparado com um sistema com as cargas equilibradas.

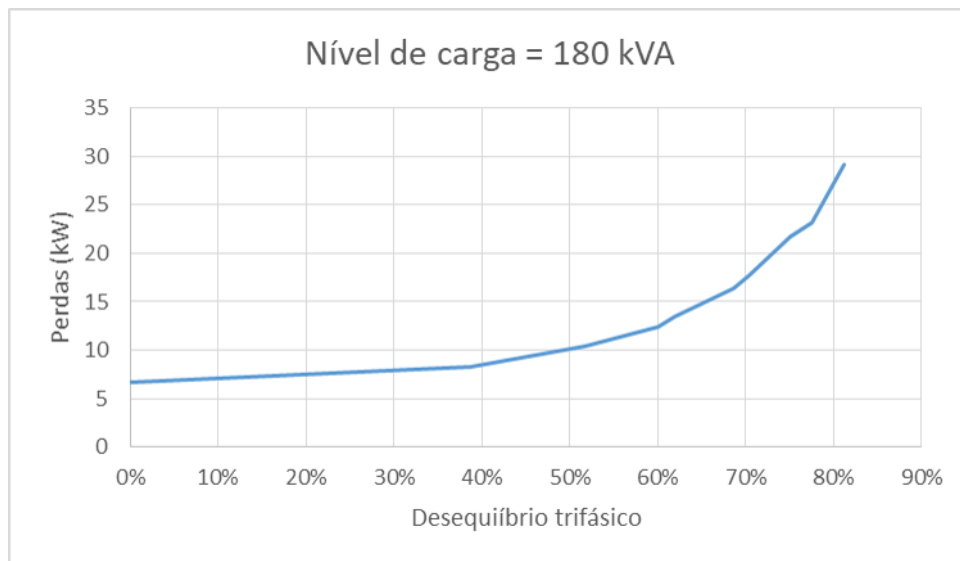


Figura 4.3: Variação das perdas com o desequilíbrio trifásico para a rede de 180 kVA

4.2 Impacto do Desequilíbrio Trifásico Numa Rede BT Real

Após o estudo efetuado sobre o potencial impacto do desequilíbrio trifásico nas perdas de uma rede BT, foi estudada uma rede BT real. De notar que, neste estudo, os dados relativos a diagramas de carga estão representados com intervalos de tempo de 15 minutos. Na figura seguinte, é possível observar o diagrama de cargas das três fases durante uma semana do mês de Janeiro do ano 2017.

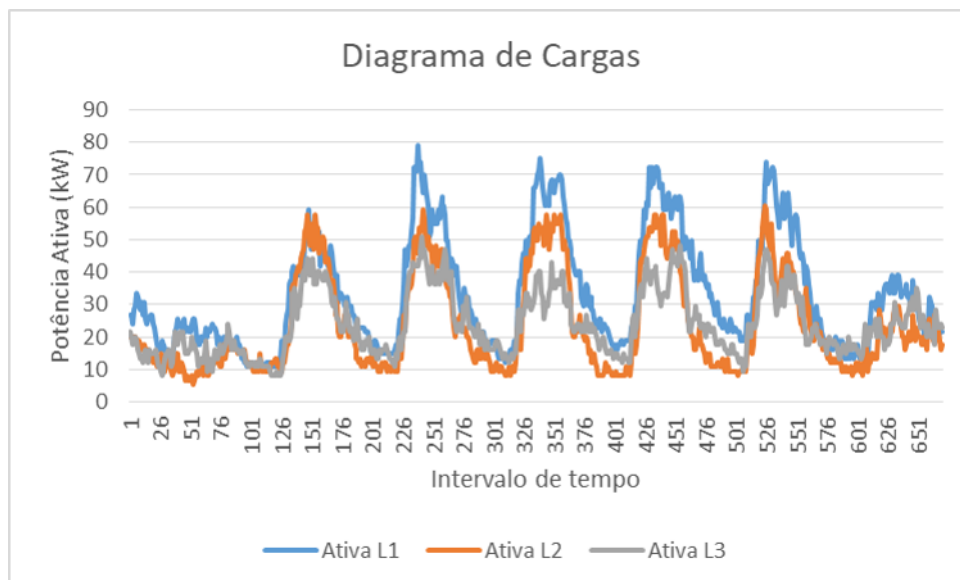


Figura 4.4: Diagrama de cargas trifásico de uma rede BT real

Na figura seguinte, encontra-se representado o nível do desequilíbrio das cargas, calculado através da fórmula 4.1.

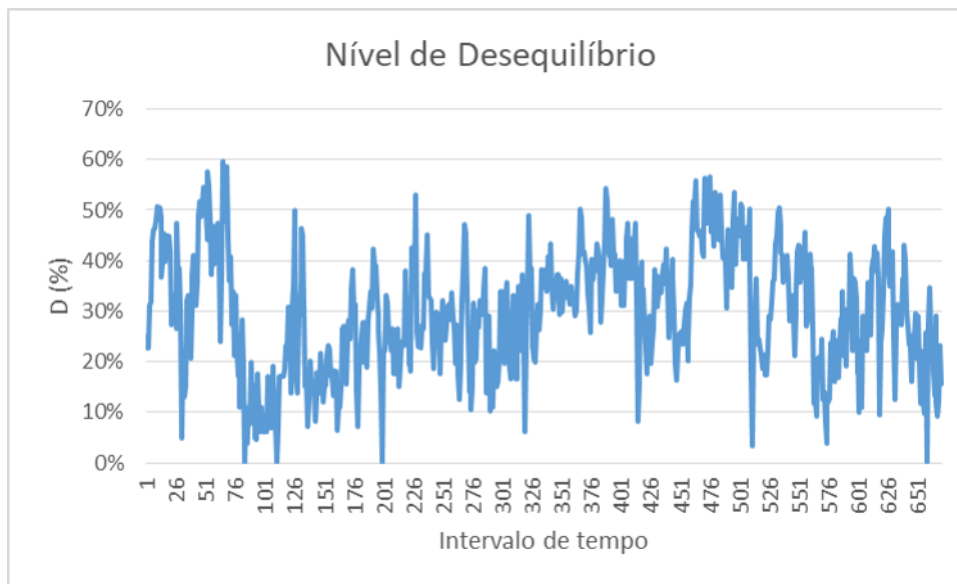


Figura 4.5: Nível de desequilíbrio das cargas da rede BT real

Os níveis de desequilíbrio das cargas encontram-se no intervalo de valores entre os 0% e os 60%. A média de valores calculada situou-se num nível de desequilíbrio de cerca de 30% para o intervalo de tempo estudado.

Recorrendo ao modelo implementado no Simulink, realizou-se o TP tendo como potência de entrada o diagrama de cargas representado na figura 4.4.

A tarefa seguinte passou por equilibrar as cargas, obtendo-se o diagrama de cargas apresentado de seguida. De notar que na figura 4.6 estão representadas as três fases, estando estas sobrepostas, razão pela qual apenas se visualiza um diagrama de carga.

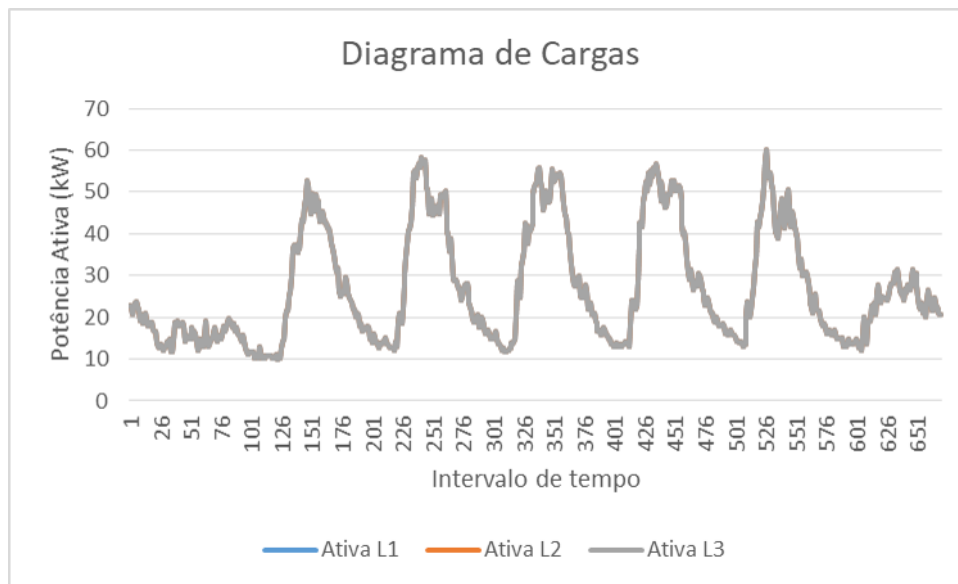


Figura 4.6: Diagrama de cargas trifásico de uma rede BT real equilibrada

Recorrendo ao modelo implementado no Simulink, voltou-se a realizar o TP tendo como potência de entrada o diagrama de cargas apresentado na figura 4.6.

Depois de realizados os TP's para os dois casos, calculou-se o valor das perdas para os mesmos, obtendo os resultados apresentados na seguinte tabela.

Tabela 4.10: Impacto do desequilíbrio trifásico nas perdas da rede BT real

Caso	1	2
Ativa total (kW)	54384,18	54384,2
Perdas totais (kW)	1240,18	1089,0
Perdas (%)	2,28	2,00
D (%)	30	0

Analisando os resultados apresentados na tabela 4.10, é possível verificar que, equilibrando o sistema, obteve-se uma diminuição do valor de potência de perdas de 151,18 kW. Estes resultados ajudam a comprovar o facto de um sistema equilibrado contribuir para a diminuição do valor das perdas de uma rede BT.

4.2.1 Impacto da Iluminação Pública

Nesta secção irão ser expostos os resultados do estudo efetuado sobre o impacto da IP num sistema. Inicialmente, efetuou-se uma análise do sistema trifásico para determinar quais as fases mais e menos carregadas, de modo a escolher vários cenários diferentes de distribuição da IP pelas três fases. De notar que, neste estudo, os dados relativos a diagramas de carga estão representados com intervalos de tempo de 15 minutos.

No primeiro caso de estudo, distribuiu-se a IP equitativamente pelas três fases. Na figura seguinte, estão representados o diagrama de cargas e o diagrama da IP.

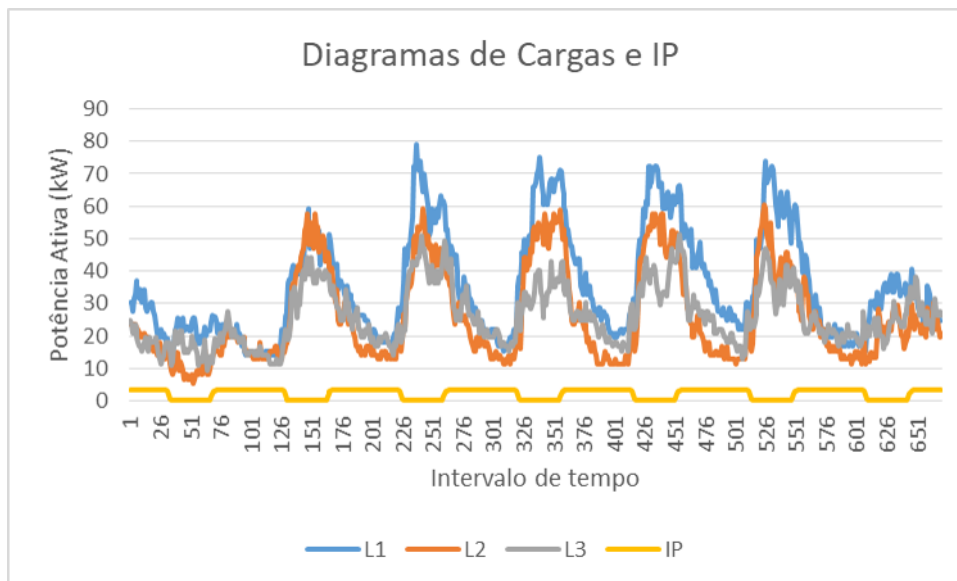


Figura 4.7: Diagramas de cargas com IP distribuída pelas três fases

No segundo caso de estudo, incluiu-se a IP somente na fase L1. Na figura seguinte, estão representados o diagrama de cargas e o diagrama da IP.

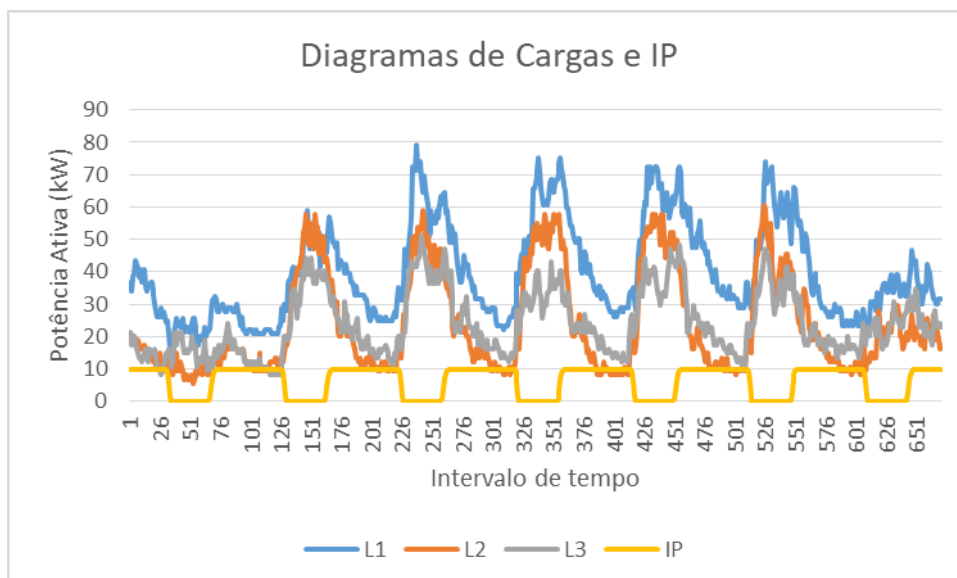


Figura 4.8: Diagramas de cargas com IP incluída na fase L1

No terceiro caso de estudo, incluiu-se a IP somente na fase L2. Na figura seguinte, estão representados o diagrama de cargas e o diagrama da IP.

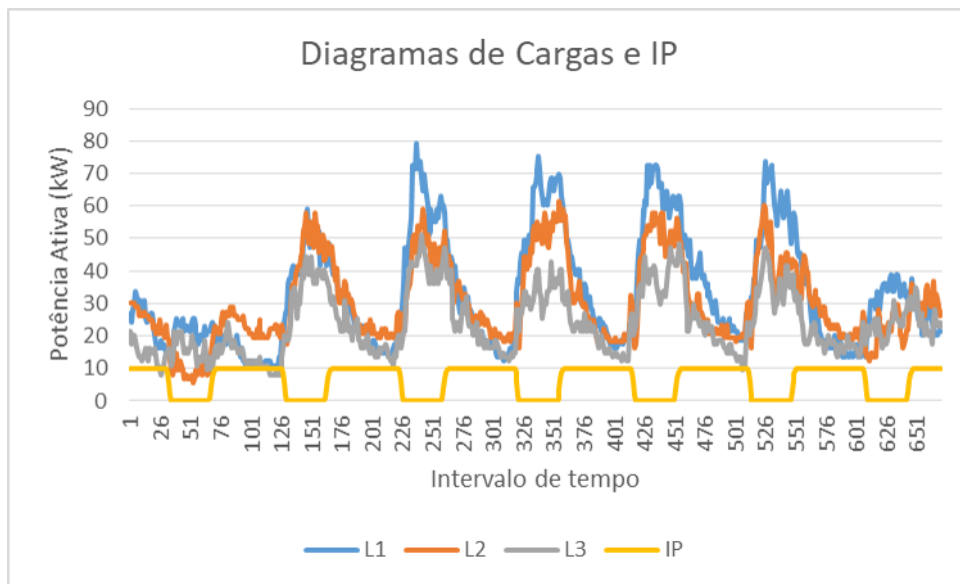


Figura 4.9: Diagramas de cargas com IP incluída na fase L2

No quarto caso de estudo, incluiu-se a IP somente na fase L3. Na figura seguinte, estão representados o diagrama de cargas e o diagrama da IP.

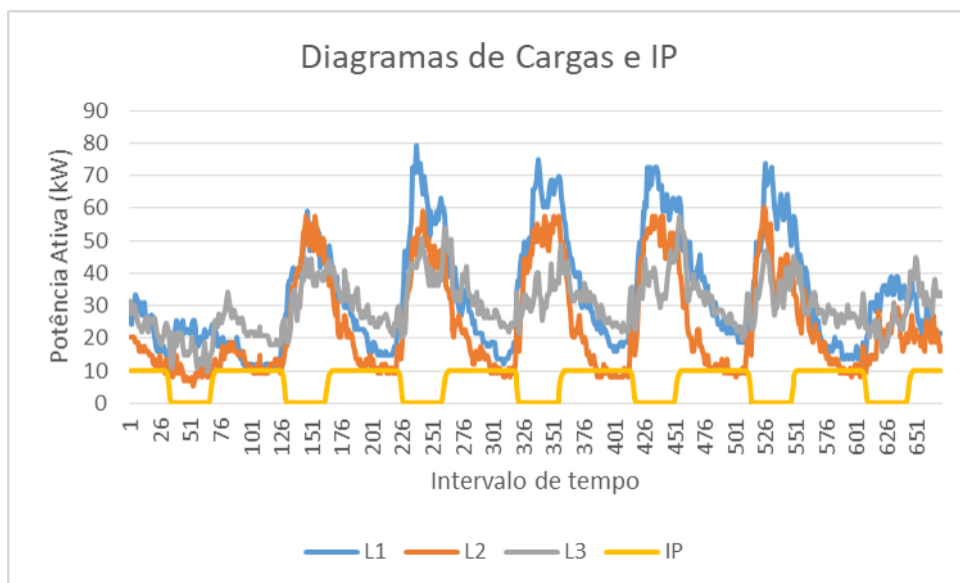


Figura 4.10: Diagramas de cargas com IP incluída na fase L3

Para cada um destes casos de estudo foi realizado o TP e calculado o valor de potência de perdas. Na tabela seguinte apresentam-se os respetivos resultados.

Tabela 4.11: Impacto da IP nas perdas da rede BT real

Caso	1	2	3	4
Ativa total (kW)	58609.1	58609.1	58609.1	58609.1
Perdas totais (kW)	1350.9	1463.8	1342	1379.7
Perdas (%)	2.305	2.498	2.29	2.354
D (%)	27.64	42.78	27.81	34.89

Analisando os resultados expostos na tabela 4.11, é possível verificar que nos casos 2 e 4, onde o sistema apresenta um nível de desequilíbrio maior, o valor de potência de perdas é maior do que nos casos 1 e 3, onde o sistema apresenta um menor nível de desequilíbrio. Assim, é possível concluir que, no caso geral, quanto mais equilibradas estiverem as cargas, menor será o valor de potência de perdas do sistema. Deste modo, o operador da rede deverá fazer um estudo para determinar qual a melhor maneira de distribuir a IP pelas três fases, de modo a que o sistema fique o mais equilibrado possível.

4.2.2 Impacto da Produção Dispersa

Nesta secção irão ser expostos os resultados do estudo efetuado sobre o impacto da PD num sistema com as cargas desequilibradas. Similarmente ao estudo sobre o impacto da IP, efetuou-se inicialmente uma análise do sistema trifásico para determinar quais as fases mais e menos carregadas. Seguidamente, foram considerados três cenários diferentes, nos quais variava a fase na qual foram instaladas as unidades de PD. Ao todo, foram instaladas 10 unidades correspondentes a painéis fotovoltaicos, com uma potência instalada de 3,68 kW. Note-se que, neste estudo, os dados relativos a diagramas de carga estão representados com intervalos de tempo de 15 minutos.

No primeiro caso, instalaram-se as unidades de PD na fase L1. Na figura seguinte, estão representados o diagrama de cargas e o diagrama de produção das unidades de PD.

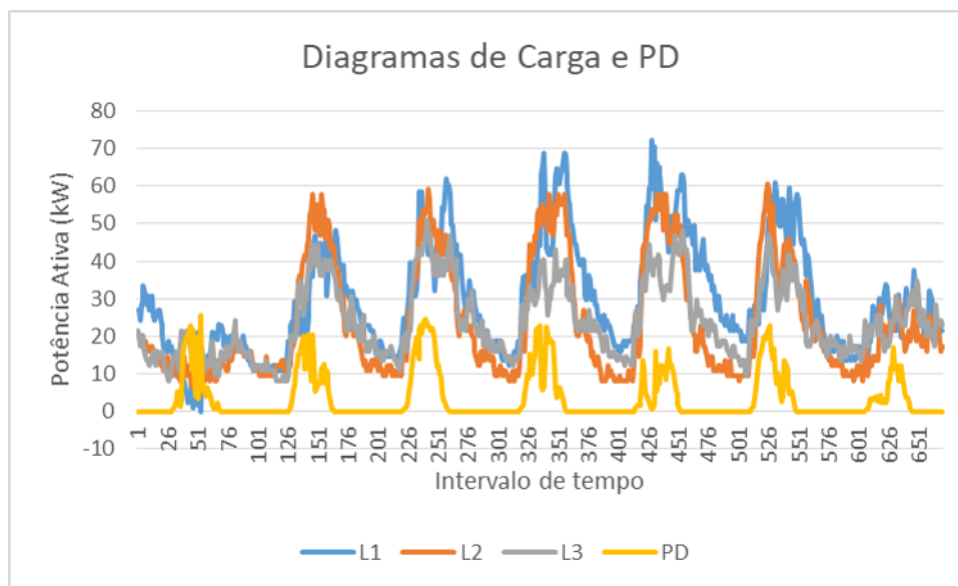


Figura 4.11: Diagramas de cargas com PD instalada na fase L1

No segundo caso, instalaram-se as unidades de PD na fase L2. Na figura seguinte, estão representados o diagrama de cargas e o diagrama de produção das unidades de PD.

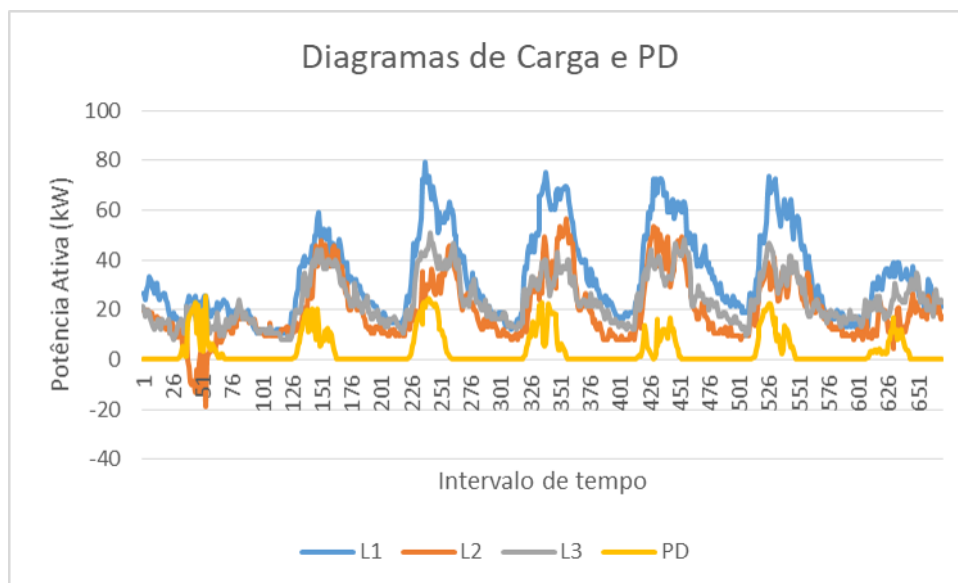


Figura 4.12: Diagramas de cargas com PD instalada na fase L2

No terceiro caso, instalaram-se as unidades de PD na fase L3. Na figura seguinte, estão representados o diagrama de cargas e o diagrama de produção das unidades de PD.

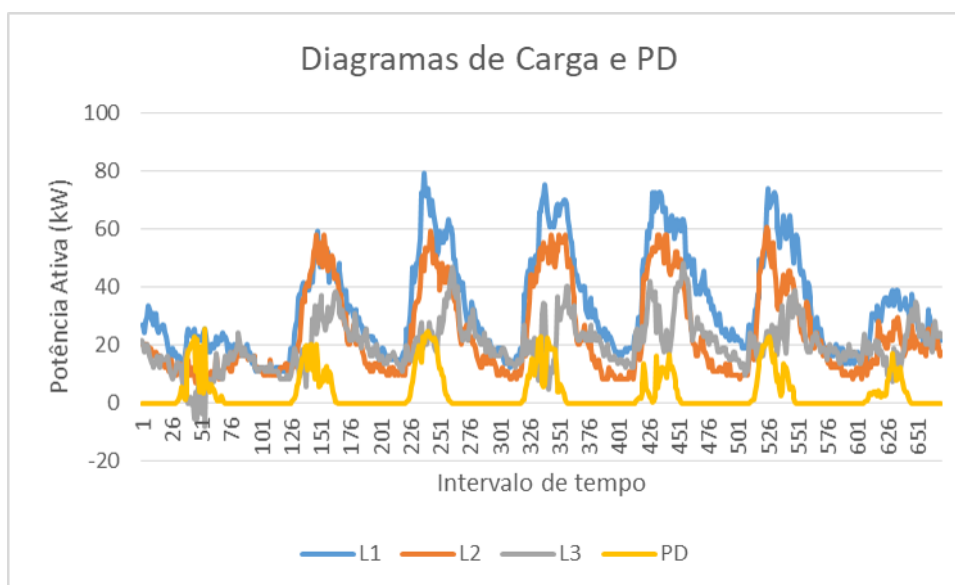


Figura 4.13: Diagramas de cargas com PD instalada na fase L3

Mais uma vez, foi realizado o TP para cada um dos casos, obtendo-se os resultados expostos na seguinte tabela.

Tabela 4.12: Impacto da PD nas perdas da rede real BT

Caso	1	2	3
Ativa total (kW)	54384,2	54384,2	54384,2
Perdas totais (kW)	1107,8	1170,3	1247,2
Perdas (%)	2,037	2,152	2,293
D (%)	27,97	33,88	34,24

Analisando os resultados expostos na tabela 4.12 é possível verificar que as perdas são menores no caso em que as unidades de PD são instaladas na fase mais carregada (L1). Este já era o resultado expectável, visto que as unidades de PD produzem a energia perto dos consumidores, diminuindo assim as perdas causadas pelo transporte da energia desde as grandes centrais até aos consumidores. Como a fase mais carregada seria a fase que acarretava maiores perdas, torna-se, assim, a melhor candidata para a instalação de unidades de PD, como foi comprovado pelos resultados acima referidos. Dos três casos, este foi também o único que não apresentou inversão de fluxos de potência.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

5.1 Conclusões

Devido à necessidade de aumentar os índices de eficiência energética através da redução das perdas nas redes de distribuição BT, e sendo o desequilíbrio trifásico um fator contribuinte para as perdas energéticas, este trabalho surgiu com o objetivo primordial de analisar o impacto do desequilíbrio trifásico nas perdas de redes de distribuição BT.

Numa primeira fase, cujo objetivo era analisar o potencial impacto do desequilíbrio trifásico nas perdas de uma rede, foram estudadas três redes com diferentes níveis de carga. Numa segunda fase, e com o intuito de obter resultados realistas, este estudo incidiu-se numa rede de distribuição BT real, tendo sido usados dados reais dos perfis da potência ativa trifásica e, conseqüentemente, do desequilíbrio real presente no sistema.

De modo a analisar e caracterizar eficientemente o impacto do desequilíbrio trifásico nas perdas, foram simulados vários cenários diferentes recorrendo a um modelo implementado no Simulink, o qual permite a simulação do trânsito de potência de uma rede trifásica desequilibrada.

Com as simulações efetuadas, descritas ao longo desta dissertação, foi possível confirmar a existência de uma relação entre o nível de desequilíbrio presente numa rede e as suas perdas. Como demonstrado no capítulo 4, através da simulação de três redes com distintos níveis de carga, sujeitas a diferentes cenários, nos quais se variou somente o nível de desequilíbrio trifásico, foi possível observar que o valor das perdas varia "exponencialmente" com o nível de desequilíbrio apresentado pela rede.

Posteriormente, analisou-se a rede de distribuição BT real, tendo sido calculado o valor de perdas apresentado pela rede em condições normais, ou seja, com as cargas desequilibradas, e o valor de perdas apresentado pela rede com as cargas equilibradas. Após esta análise, verificou-se uma diminuição do valor de potência de perdas, quando a rede se encontra com as cargas equilibradas.

Com o peso que a iluminação pública representa na carga total de uma rede de distribuição, tornou-se relevante estudar o impacto que esta poderia causar nas perdas das redes de distribuição BT. Perante o estudo feito, tornou-se evidente que a distribuição da IP pelas três fases tem um

papel importante nas perdas verificadas na rede onde esta se encontra inserida. Após a análise dos resultados obtidos no estudo do impacto da IP, conclui-se que, de um modo geral, quanto mais equilibradas se encontrarem as cargas, menor será o valor das perdas do sistema. Deste modo, é essencial, para o operador da rede, realizar um estudo prévio à instalação da iluminação pública, para aferir a melhor distribuição da IP pelas três fases, com o intuito de obter o sistema de cargas mais equilibrado possível.

Com a mudança de paradigma da estrutura hierarquizada do SEE e a crescente adesão a tecnologias de produção descentralizada, outro fator que se revela extremamente importante nas perdas verificadas numa rede de distribuição BT é a presença de unidades de produção dispersa. Este tipo de produção, além de potenciar a redução de investimento de novas instalações do sistema eletroprodutor e infraestruturas de rede, como por exemplo linhas e subestações, permite reduzir a energia requisitada às centrais de produção de energia elétrica. Deste modo, o fluxo nas linhas do SEE diminuirá consideravelmente, o que contribui para uma diminuição do valor de perdas verificadas nas redes do SEE.

Assim, decidiu-se estudar o impacto que a PD pode ter nas perdas das redes de distribuição BT. Para isso, realizou-se um estudo análogo ao efetuado sobre o impacto da IP nas perdas. Deste modo, procedeu-se ao estudo prévio das fases mais ou menos carregadas, de modo a concluir qual a melhor fase para a instalação de unidades de PD. Analisando, através de simulações, o cenário mais benéfico para a instalação de unidades PD, concluiu-se que o melhor cenário, tendo em conta a diminuição do valor de perdas, seria a instalação de unidades de PD na fase mais carregada do sistema, pois a presença de unidades de PD diminui o fluxo dessa fase, reduzindo o valor de perdas do sistema, assim como o desequilíbrio trifásico. O cenário simulado com os piores resultados, no que toca à diminuição de perdas, foi o caso onde as unidades de PD foram instaladas na fase menos carregada do sistema. Este caso apresentou um aumento das perdas, que se justifica pelo aumento do desequilíbrio trifásico.

5.2 Trabalho Futuro

Após a realização deste trabalho todos os objetivos a que o estudo se propunha foram atingidos, assim, este pode servir de ponto de partida para estudos futuros. Deste modo, sugere-se estender o presente estudo a outras redes de distribuição BT, com o intuito de confirmar se os resultados positivos obtidos neste estudo são extensíveis a outras redes.

Visto que no futuro os veículos elétricos representarão uma carga considerável nas redes de distribuição BT, é importante entender as implicações que este tipo de carga, quando presente em grande escala, irá ter na rede. Portanto, sugere-se, de forma análoga aos estudos realizados neste trabalho sobre a inclusão de PD e IP, estudar o impacto dos veículos elétricos nas redes de distribuição BT, quer ao nível do desequilíbrio, quer ao nível de perdas.

Referências

- [1] PORDATA - Consumo de energia eléctrica. URL: <https://www.pordata.pt/Portugal/Consumo+de+energia+el{é}ctrica+total+e+por+tipo+de+consumo-1124>.
- [2] Portal ERSE - Perdas nas redes de distribuição. URL: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/actividadesdosector/distribuicao/Paginas/RND-Perdas.aspx>.
- [3] Charles K Alexander e Matthew N O Sadiku. *Electric Circuits*. 5th edition edição.
- [4] Diário e República. 5970-(2) MINISTÉRIO DA ECONOMIA, DA INOVAÇÃO E DO DESENVOLVIMENTO. Decreto-Lei n.º 138-A/2010. 2010.
- [5] EDP Distribuição. Plano de Desenvolvimento e Investimento da Rede de Distribuição 2015-2019. URL: <http://www.erse.pt/pt/consultaspublicas/consultas/Documents/49{ }1/PDIRD2015-2019-Plano.pdf>.
- [6] ENTIDADE REGULADORA DOS SERVIÇOS ENERGÉTICOS PROVEITOS PERMITIDOS E AJUSTAMENTOS PARA 2018 DAS EMPRESAS REGULADAS DO SETOR ELÉTRICO . 2017. URL: www.erse.pt.
- [7] Transmission and Distribution Losses (Power).
- [8] Total Losses in Power Distribution and Transmission Lines | EEP. URL: <http://electrical-engineering-portal.com/total-losses-in-power-distribution-and-transmission-lines-1>.
- [9] J P Navani, N K Sharma, e Sonal Sapra. Technical and Non-Technical Losses in Power System and Its Economic Consequence in Indian Economy. *International Journal of Electronics and Computer Science Engineering*.
- [10] Dolores H Russ e by Dan Suriyamongkol. NON-TECHNICAL LOSSES IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS The Faculty of the. 2002.
- [11] D. William e Stevenson Jr. *Elements of Power System Analysis 4th Edition*.
- [12] James William. Nilsson e Susan A. Riedel. *Electric circuits*. Prentice Hall, 2014. URL: <http://lib.hpu.edu.vn/handle/123456789/21319>.
- [13] R. A. Matula. Electrical resistivity of copper, gold, palladium, and silver. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 8:1147–1298, 1979. doi:10.1063/1.555614.
- [14] J Nuno Fidalgo e Jean Sumaili Akilimali. Projecto ASIRP - Análise e Selecção de Intervenções para Redução das Perdas nas Redes de Distribuição. 2010.

- [15] J Nuno Fidalgo e Jean Sumaili Akilimali. Projecto ASIRP - Análise e Selecção de Intervenções para Redução das Perdas nas Redes de Distribuição (Análise Complementar 2). 2011.
- [16] Luis F. Ochoa e Gareth P. Harrison. Minimizing Energy Losses: Optimal Accommodation and Smart Operation of Renewable Distributed Generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(1):198–205, feb 2011. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5471114/>, doi:10.1109/TPWRS.2010.2049036.
- [17] Carmen L.T. Borges e Djalma M. Falcão. Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvement. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 28(6):413–420, jul 2006. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061506000482>, doi:10.1016/J.IJEPES.2006.02.003.
- [18] M.A. Kashem, A.D.T. Le, M. Negnevitsky, e G. Ledwich. Distributed generation for minimization of power losses in distribution systems. Em *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, página 8 pp. IEEE, 2006. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1709179/>, doi:10.1109/PES.2006.1709179.
- [19] Young-Jae Jeon, Jae-Chul Kim, Jin-O Kim, Joong-Rin Shin, e K.Y. Lee. An efficient simulated annealing algorithm for network reconfiguration in large-scale distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 17:1070–1078, 2002.
- [20] Y.-Y. Hong e S.-Y. Ho. Determination of Network Configuration Considering Multiobjective in Distribution Systems Using Genetic Algorithms. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(2):1062–1069, 2005. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1425604/>, doi:10.1109/TPWRS.2005.846067.
- [21] K. Prasad, R. Ranjan, N.C. Sahoo, e A. Chaturvedi. Optimal Reconfiguration of Radial Distribution Systems Using a Fuzzy Mutated Genetic Algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(2):1211–1213, 2005. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1413376/>, doi:10.1109/TPWRD.2005.844245.
- [22] Jizhong Zhu. Optimal Reconfiguration of Electrical Distribution Network. Em *OPTIMIZATION OF POWER SYSTEM OPERATION*, páginas 483–528. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ, USA, 2015. URL: <http://doi.wiley.com/10.1002/9781118887004.ch12>, doi:10.1002/9781118887004.ch12.
- [23] R. Srinivasa Rao, K. Ravindra, K. Satish, e S. V. L. Narasimham. Power Loss Minimization in Distribution System Using Network Reconfiguration in the Presence of Distributed Generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(1):317–325, feb 2013. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6205640/>, doi:10.1109/TPWRS.2012.2197227.
- [24] Y. Mohamed Shuaib, M. Surya Kalavathi, e C. Christofer Asir Rajan. Optimal capacitor placement in radial distribution system using Gravitational Search Algorithm. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 64:384–397, 2015. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.07.041>, doi:10.1016/j.ijepes.2014.07.041.
- [25] Sneha Sultana e Provas Kumar Roy. Optimal capacitor placement in radial distribution systems using teaching learning based optimization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 54:387–398, 2014. doi:10.1016/j.ijepes.2013.07.011.

- [26] K.R. Devabalaji, K. Ravi, e D.P. Kothari. Optimal location and sizing of capacitor placement in radial distribution system using Bacterial Foraging Optimization Algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 71:383–390, 2015. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014206151500143X>, doi:10.1016/j.ijepes.2015.03.008.
- [27] Produção Dispersa, Unidade Curricular do 5º ano do MIEEC, FEUP. URL: https://sigarra.up.pt/feup/pt/ucurr_geral.ficha_uc_view?pv_ocorrencia_id=385678.
- [28] Simulink - Simulation and Model-Based Design. URL: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>.