



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Diogo Aventino Macedo Faria

Qualidade de Energia Eléctrica – Caracterização de Cavas de Tensão em Redes MT

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Especialização em Energia. Orientador: Professor Doutor Humberto Manuel Matos Jorge. Apresentada ao Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, em Fevereiro de 2013.

Coimbra
2013



Universidade de Coimbra

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Qualidade de Energia Eléctrica – Caracterização de Cavas de Tensão em Redes MT

Diogo Aventino Macedo Faria

Júri

Presidente: José Manuel Fernandes Craveirinha, Professor Catedrático

Orientador: Humberto Manuel Matos Jorge, Professor Auxiliar

Vogal: Rita Cristina Girão Coelho da Silva, Professora Auxiliar

Coimbra, Janeiro 2013

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Ano Lectivo de 2012/2013



Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de
Computadores
– Especialização em Energia –

Qualidade de Energia Eléctrica – Caracterização de Cavas de Tensão em Redes MT

Aluno:

Diogo Aventino Macedo Faria

Orientador:

Professor Doutor Humberto Manuel Matos Jorge

“Everything around you that you call life was made up by people that were no smarter than you and you can change it, you can influence it, you can build your own things that other people can use.”

Steve Jobs

Agradecimentos

Quero começar por agradecer ao meu orientador Professor Doutor Humberto Manuel Matos Jorge pelo apoio prestado, constante e pronta disponibilidade, acompanhamento científico e pela transmissão de conceitos importantes, bem como na orientação de tarefas, estruturação, correcção e revisão durante a elaboração desta dissertação.

Um agradecimento também ao Eng.º Nuno Melo, da EDP Distribuição, pela ajuda, transmissão de alguns conceitos, assim como algumas indicações bibliográficas e disponibilização de dados para a realização desta Dissertação.

Agradeço também à Mafalda por todo o incentivo, carinho, compreensão e sacrifício ao longo destes anos, em particular a sua ajuda e paciência durante a realização deste trabalho.

Aos meus pais, irmão, avó e restante família um muito obrigado por todo o apoio, sacrifício e acompanhamento ao longo destes anos para que a concretização deste sonho fosse possível.

Obrigado também a todos os meus amigos e colegas pelo apoio, companheirismo e amizade demonstrada ao longo de toda a minha vida.

Não posso deixar ainda de agradecer a todos os que de uma forma ou de outra tiveram relevância durante alguma fase do meu percurso académico, permitindo/ajudando que eu alcançasse esta etapa.

Resumo

A ocorrência de um defeito num Sistema de Energia Eléctrica poderá causar a interrupção da alimentação, pelo que este deverá ser detectado, localizado e eliminado no mais curto espaço de tempo possível. Nas redes de Distribuição, devido muitas vezes ao número reduzido de informação disponível, a determinação da localização dos defeitos é uma tarefa árdua e morosa. Consequentemente, impõe-se o recurso por parte das Operadoras de Rede a métodos que, contribuindo para uma diminuição do número de eventos de Cavas de Tensão, assegurem a redução e frequência, das falhas de alimentação.

Esta dissertação aborda métodos de classificação de Cavas de Tensão destinados a melhorar a compreensão da compatibilidade entre as instalações e o fornecimento de electricidade.

Neste documento é também feito uma análise de alguns dados de monitorização de Cavas de Tensão.

Finalmente, é ainda referido um método que relaciona a tensão residual num barramento de Média Tensão, com a distância ao defeito. Este método pode também ser utilizado para uma estimativa da localização de um defeito.

Palavras-Chave: Qualidade de Energia Eléctrica, Cavas de Tensão, Localização de Defeitos, Redes de Média Tensão, Curva de Partilha de Responsabilidade

Abstract

The occurrence of a fault in an Electric Energy System might interrupt the Power Supply. The fault should be detected, traced and eliminated with the utmost brevity. In the electric distribution networks, fault location is an arduous and long task mainly due to little information available. Consequently, Electric Utilities have to resort to methods which, by contributing to diminish the number of voltage dips events, ensure a shorter duration and frequency of the outage.

This thesis studies the means of classification of voltage dips aiming to improve the understanding of compatibilities between facilities and the electricity supplying.

In this document is also done a study of a few voltage dips monitoring data.

Finally, it is also mentioned a method which relates residual voltage in a medium voltage bus, with the distance to the fault. This method can also be used to estimate the location of a fault.

Keywords: Power Quality, Voltage Dips, Fault Location, Medium Voltage Networks, Curve for Responsibility Sharing

Índice

Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas.....	xvii
1. Introdução	1
1.1. Apresentação	1
1.2. Motivação e Objectivos	2
1.3. Estrutura da Dissertação	3
2. Qualidade de Serviço	5
2.1. Introdução.....	5
2.2. Qualidade de Energia Eléctrica	6
2.3. Legislação da Qualidade de Energia, Regulação e Normalização	7
2.3.1. Melhorias da nova versão da EN 50160:2010.....	7
2.3.2. Regulação de Cavas de Tensão na Suécia	7
2.3.3. Indicadores para Cavas de Tensão.....	8
2.3.3.1. Características da Cava	8
2.3.3.2. Indicadores Locais.....	9
2.3.3.3. Indicadores do Sistema.....	10
2.4. Principais Perturbações da Qualidade de Energia	10
2.4.1. Interrupções	10
2.4.2. Cavas de Tensão	10
2.4.3. Sobretensões	11
2.4.4. Desequilíbrio de Tensões.....	11
2.4.5. Distorção Harmónica de Tensão.....	11
3. Cavas de Tensão	13
3.1. Introdução.....	13
3.2. Origem das Cavas de Tensão.....	14
3.2.1. Defeitos nas Redes de Transporte e Distribuição	15
3.3. Propagação do Defeito.....	17
3.4. Descrição e Caracterização.....	18

3.5.	Resumo das Características de uma Cava de Tensão	19
3.6.	Área de Vulnerabilidade	20
3.7.	Curva de Partilha de Responsabilidade e sua Evolução	21
3.8.	Imunidade das Cargas Sensíveis às Cavas de Tensão	24
4.	Estudo da Ocorrência de Cavas de Tensão, Métodos para a sua Prevenção e Soluções para Imunização	27
4.1.	Estudo para uma linha de 30 kV	27
4.2.	Estudo para uma Instalação Industrial alimentada por uma linha de 30 kV	29
4.3.	Prevenção de Cavas de Tensão na Óptica do Distribuidor.....	30
4.4.	Soluções para Imunização de Equipamentos na Óptica do Utilizador Final.....	34
5.	Método Proposto para a Localização de Defeitos: Relação Tensão Residual / Distância ao Defeito.....	37
5.1.	Metodologia implementada	37
5.2.	Simulações.....	40
5.2.1.	Caso 1	40
5.2.2.	Caso 2	42
5.2.3.	Caso 3	42
5.2.4.	Caso 4	43
5.3.	Conclusões.....	44
6.	Conclusões	47
6.1.	Conclusão	44
6.2.	Trabalhos Futuros	44
	Bibliografia.....	49
	Anexos.....	51
A.	Dados e Resultados das Simulações Realizadas.....	51
	Caso 1	51
	Caso 2	53
	Caso 3	56
	Caso 4	58

Índice de Figuras

Figura 1: Curvas utilizadas na regulação Sueca [6]	8
Figura 2: Cava de tensão em função da tensão de declarada [11].....	13
Figura 3: Cava de tensão em função da tensão de referência deslizante [11].....	14
Figura 4: Comportamento da tensão e corrente em linhas de um barramento, sujeito a um defeito nas linhas [11]	16
Figura 5: Esquema simplificado dos vários níveis de tensão presentes num sistema eléctrico [8]	17
Figura 6: Os três tipos de cava apresentados para representar a amplitude e desequilíbrio de fases [13]	18
Figura 7: Exemplo de uma área de vulnerabilidade [14]	21
Figura 8: Curva de partilha de responsabilidade [20]	22
Figura 9: Evolução da curva de partilha de responsabilidade de acordo com o regulamento Sueco [20]	22
Figura 10: Limites de acordo com o regulamento Sueco para redes acima dos 45 kV [20].....	24
Figura 11: Limites de acordo com o regulamento Sueco para redes com 45kV ou menos [20]...	24
Figura 12: Curva de tolerância de um equipamento [21].....	25
Figura 13: Curva CBEMA e curva revista, ITIC [7].....	26
Figura 14: Curva ITIC e curva SEMI F47 [21].....	26
Figura 15: Tensão residual e duração do defeito na linha de 30 kV	28
Figura 16: Tensão residual e duração do defeito no ponto de entrega da instalação	30
Figura 17: Exemplo da poda de árvores numa zona florestal [22].....	32
Figura 18: Barramento de Média Tensão com defeito na Saída 1 [1].....	32
Figura 19: Tensões e correntes relativas à Figura 18 [1]	33
Figura 20: Separação dos barramentos numa subestação [1].....	34
Figura 21: Rede simplificada	37
Figura 22: Curto-circuito trifásico simétrico [24]	38
Figura 23: Defeito trifásico simétrico	39
Figura 24: Relação tensão residual / distância ao defeito do Caso 1	41
Figura 25: Relação tensão residual / distância ao defeito do Caso 2	42
Figura 26: Relação tensão residual / distância ao defeito do Caso 3	43
Figura 27: Relação tensão residual / distância ao defeito do Caso 4	44
Figura 28: Relação tensão residual / distância ao defeito de todos os casos simulados	45

Índice de Tabelas

Tabela 1: Classificação das Cavas de Tensão de acordo com a norma EN 50160 [6].....	9
Tabela 2: Resumo das características de uma cava de tensão [13]	19
Tabela 3: Dados das cavas de tensão na linha de 30 kV	27
Tabela 4: Classificação dos dados das curvas de tensão de acordo com a norma EN 50160:2010	28
Tabela 5: Dados das tensões no ponto de entrega à instalação [12]	29
Tabela 6: Classificação dos dados das curvas de tensão de acordo com a norma EN 50160:2010	30
Tabela 7: Resumo das principais características dos 4 casos simulados.....	44
Tabela 8: Dados da linha MT do Caso 1	51
Tabela 10: Dados da linha MT do Caso 2	53
Tabela 11: Resultados dos cálculos realizados para o Caso 2.....	53
Tabela 12: Dados da linha MT do Caso 3	56
Tabela 13: Resultados dos cálculos realizados para o Caso 3.....	56
Tabela 14: Dados da linha MT do Caso 4	58
Tabela 15: Resultados dos cálculos realizados para o Caso 4.....	58

Acrónimos

AT – Alta Tensão

BT – Baixa Tensão

CBEMA - *Computer Business Equipment Manufacturers Association*

CEER – *Council of European Energy Regulators*

CENELEC – Comité Europeu de Normalização Electrotécnica

CIGRE - *International Council on Large Electric Systems*

CIREN - *International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*

DGEG – Direcção Geral de Energia e Geologia

ERCEG - *Energy Regulators Group for Electricity and Gas*

ERSE – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

ITIC - *Information Technology Industry Council*

MAT – Muito Alta Tensão

MT - Média Tensão

RQS – Regulamento da Qualidade de Serviço

RMS – *Root Mean Square*

SEMI - *Semiconductor Equipment Manufacturing Industry*

1. Introdução

1.1. Apresentação

A evolução tecnológica e o elevado desenvolvimento industrial que caracteriza a civilização contemporânea, tornam a nossa sociedade fortemente dependente de energia, nomeadamente de energia eléctrica. Esta dependência, aliada aos padrões de Qualidade de Serviço actualmente impostos, repercute-se nos sistemas de energia eléctrica, originando um acréscimo de complexidade, assim como um aumento da sua importância.

Além disso, o crescimento dos sistemas de energia eléctrica reflecte-se em todas as suas componentes, em particular nas redes de distribuição, através do aumento do número de agentes e comprimento das linhas eléctricas em operação.

A principal função dos sistemas de energia eléctrica é assegurar o fornecimento ininterrupto de energia aos seus clientes, de acordo com padrões de qualidade previamente estabelecidos [1]. Apesar de todas as precauções tomadas aquando do planeamento e concepção destes sistemas com vista à garantia de um elevado nível de segurança associado à respectiva exploração, é impossível eliminar totalmente a ocorrência de defeitos, que podem ter diversas causas, nomeadamente condições climatéricas extremas, quebras de isolamento e os mais variados acidentes.

A ocorrência de defeitos pode causar a interrupção da alimentação dos clientes, com todas as consequências daí provenientes para os mesmos, assim como perdas de receitas e sujeição a penalidades pecuniárias para a operadora de energia. Quanto maior o período de interrupção, devido à ocorrência de um defeito, maiores serão as consequências para os clientes e para a operadora de energia. Originando uma maior deterioração do nível de Qualidade de Serviço prestado por esta última.

Assegurar a continuidade de serviço não é uma preocupação recente das operadoras de energia. A maior dimensão das redes e, conseqüentemente, a maior probabilidade de ocorrência de defeitos, associado à imposição de padrões de Qualidade de Serviço cada vez mais exigentes (traduzidos em incentivos e penalidades financeiras) faz, contudo, com que a continuidade de serviço assuma uma importância crescente.

A melhoria da continuidade de serviço e, conseqüentemente, da Qualidade de Serviço prestada, pode ser conseguida através da construção de novas infra-estruturas, nomeadamente subestações e circuitos de alimentação ou revitalização das instalações existentes e instalação de relés de protecção nos nós das redes de distribuição, possibilitando a exploração das redes em anel fechado ou em malha, ao invés da exploração normalmente radial. Estas soluções revelam-se, porém, muito dispendiosas e, por conseguinte, de difícil implementação num mercado eléctrico liberalizado, cada vez mais competitivo.

Actualmente, as operadoras de rede procuram cumprir os padrões de Qualidade de Serviço estabelecidos, fornecendo energia de forma segura e fiável, mas rentável um preço competitivo em especial para a indústria [2].

Desde a instalação dos primeiros sistemas de energia eléctrica, a localização de defeitos tem sido um dos assuntos de estudo por parte de muitos investigadores. A localização de defeitos ainda é um tema que permanece em aberto. Isto deve-se à variedade de técnicas disponíveis e à diversidade das características operacionais e técnicas dos Sistemas de Energia Eléctrica.

Uma localização precisa de defeitos reduz os custos operacionais, reduzido horas de actuação das equipas de manutenção, assim como acelera as reparações e reposição de linhas e, em última análise, reduz a perda de receitas causada por interrupções do fornecimento de energia [3].

1.2. Motivação e Objectivos

A localização de defeitos nas redes de distribuição apresenta-se geralmente como uma tarefa difícil e morosa, sendo esta situação, na maioria das vezes, justificada pela reduzida quantidade de informação disponível.

Na ocorrência de um defeito, que cause a interrupção da alimentação de consumidores, a localização deste constitui uma das quatro etapas (identificação da secção afectada; isolamento da secção em defeito; localização do defeito na secção afectada; reposição em serviço da secção em defeito). Estas realizam-se na reposição em serviço da zona afectada, e, por conseguinte, uma das acções que, a otimizar-se, poderá ter impacto positivo na continuidade de serviço do Sistema [4].

Num momento em que, a par da rentabilidade, a Qualidade de Serviço é um dos principais desafios que se colocam às Operadoras de Energia, esta dissertação procura explorar as soluções

actualmente conhecidas e apresentar um método, no âmbito da detecção e localização de defeitos em redes de Média Tensão.

1.3. Estrutura da Dissertação

A estrutura da dissertação reflecte os objectivos que estiveram na base do trabalho desenvolvido. Assim, após a introdução, no Capítulo 2 é apresentado o conceito de Qualidade de Serviço, com enquadramento na Qualidade de Energia Eléctrica e sua normalização e legislação, bem como um resumo das principais perturbações da Qualidade de Energia,

No Capítulo 3 é apresentado o fenómeno de cavas de tensão, com foco na sua origem, caracterização e propagação. São ainda abordados temas importantes como área de vulnerabilidade, curva de partilha de responsabilidade e curvas de tolerância de tensão.

No Capítulo 4 é apresentado uma análise de dados de monitorização sobre cavas de tensão, numa linha e numa instalação, assim propostas para a sua prevenção.

No Capítulo 5 é proposto um método de estudo da relação tensão residual no barramento de Média Tensão com a distância ao defeito.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões mais importantes que é possível retirar do trabalho desenvolvido.

2. Qualidade de Serviço

2.1. Introdução

O crescimento populacional e o desenvolvimento económico que lhe está associado tem impacto directo nos consumos energéticos e, conseqüentemente, nos esforços a que as redes de transporte e distribuição de energia eléctrica são submetidas.

Paralelamente à crescente procura de energia, a Qualidade de Serviço assume um papel cada vez mais importante, devido ao crescente número de equipamentos sensíveis a perturbações na qualidade de energia eléctrica, com impacto directo na competitividade das organizações, como é o caso das indústrias baseadas em processos contínuos de produção e das indústrias com elevada penetração de tecnologias de informação.

Com vista a responder à cada vez maior exigência dos consumidores, as operadoras de rede vêm-se obrigadas melhorar as suas redes de transporte e distribuição, nomeadamente, através da adopção de soluções globais que permitam otimizar a gestão das redes. É exemplo o caso dos sistemas de detecção e localização de defeitos que, assegurando uma diminuição da frequência e duração das falhas de energia, contribuem para a melhoria dos índices de Qualidade de Serviço.

Em contraponto à necessidade dos investimentos ditados pela cada vez maior exigência dos clientes, as operadoras de rede deparam-se com mercados liberalizados, em que os índices de competitividade são cada vez maiores, o que as leva a reduzir os investimentos nos Sistemas de Energia Eléctrica, com o objectivo de manterem os seus níveis de rentabilidade. Os países Europeus, com excepção da Alemanha, com vista a solucionarem este paradoxo, criaram entidades reguladoras responsáveis pela definição de padrões mínimos de Qualidade de Serviço e pela supervisão da aplicação destes pelas Operadoras de Energia [5].

As entidades reguladoras têm noção das pressões financeiras a que as operadoras de rede estão sujeitas para reduzirem os custos e que, conseqüentemente, poderiam levar a uma redução da Qualidade de Serviço prestado. Desta forma, os Reguladores Europeus, avaliando a performance das operadoras de rede, criaram esquemas de incentivos dedicados a recompensar as operadoras que garantam uma qualidade de serviço de acordo com as normas, nomeadamente a EN 50160, *Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems*.

Em Portugal, a ERSE é o órgão a quem compete assegurar o cumprimento do Regulamento de Qualidade de Serviço pelas operadoras de rede [1].

O Regulamento de Qualidade de Serviço, cuja aprovação e publicação inicialmente da responsabilidade da DGEG - Direcção Geral de Energia e Geologia e recentemente passou a ser da ERSE, estabelece os padrões mínimos de qualidade no fornecimento de energia eléctrica, no que respeita à sua natureza técnica e comercial.

A avaliação do desempenho das operadoras de rede é realizada pela ERSE, com base em indicadores definidos pelo Regulamento de Qualidade de Serviço, sendo estas alvo de incentivos ou penalidades económicas consoante o cumprimento, ou incumprimento, respectivamente, dos níveis de Qualidade de Serviço estabelecidos.

2.2. Qualidade de Energia Eléctrica

A Qualidade de Energia está a tornar-se um problema cada vez mais importante em muitos países devido, entre outras coisas, aos aumentos nos últimos 20/30 anos da susceptibilidade dos equipamentos do utilizador final e instalações industriais a distúrbios de tensão, e à maior emissão de perturbações por parte dos equipamentos do utilizador final [6].

Nos dias de hoje, os sistemas de transporte e distribuição de energia são frequentemente assolados com vários problemas. Estes problemas afectam a qualidade da energia que chega aos clientes.

Os dois maiores problemas que estes sistemas têm de lidar, constantemente, são as interrupções, sejam eles de cariz breve ou longo, e as cavas de tensão provocadas por defeitos. As cavas de tensão serão abordadas mais aprofundadamente no Capítulo 3 desta dissertação.

Os clientes esperam uma melhor qualidade da energia recebida e por isso os sistemas têm de tentar melhorar o seu serviço, de um modo constante e eficaz. Isto é compreensível uma vez que aquando das interrupções os clientes afectados ficam sem poder utilizar esses serviços. Deste modo, as operadoras do sistema perdem rendimentos devido à não venda dos seus serviços enquanto o problema se manifestar.

Como se tal não fosse, por si só, suficiente para estimular as operadoras de transporte e as operadoras de distribuição a melhorar a qualidade da energia fornecida, ainda podem ser penalizadas em certas ocasiões por demoras na detecção e reparação desses mesmos problemas.

Tudo isto leva as operadoras a tentar mitigar e prevenir estes tipos de problemas de modo a minimizar os constrangimentos para o cliente, contribuindo assim para uma maior satisfação deste, na utilização dos seus serviços.

A partilha de responsabilidade foi identificada como um princípio importante para a regulação da Qualidade de Energia. O objectivo final da regulação da Qualidade de Energia é assegurar que o funcionamento dos equipamentos não seja afectado por perturbações de tensão provenientes da rede [6].

O conceito de Qualidade de Energia Eléctrica surge pela primeira vez num estudo realizado em 1968 pela Marinha dos Estados Unidos. Este conceito, decorrente das evoluções tecnológicas, sofreu, ao longo dos anos, diversas alterações, particularmente ao nível da importância cada vez maior atribuída à qualidade da forma de onda da tensão [7].

2.3. Legislação da Qualidade de Energia, Regulação e Normalização

2.3.1. Melhorias da nova versão da EN 50160:2010

Os Reguladores Europeus de Energia fizeram uma lista de 6 recomendações para a melhoria da norma Europeia EN 50160 durante o processo de consulta realizado em 2006-2007:

- Melhorar definições e regras de medição;
- Ampliar o alcance da norma EN 50160 para sistemas AT e MAT;
- Adotar novos limites para variações de tensão, evitando a cláusula "95% do tempo" e longos intervalos de tempo para a média dos valores medidos;
- Evitar valores indicativos ambíguos para eventos de tensão e introduzir uma classificação da gravidade das cavas de tensão e sobretensões;
- Introduzir limites para eventos de tensão em função das características da rede;
- Considerar os deveres e direitos de todas as partes envolvidas e propor um quadro geral para dividir a responsabilidade entre as empresas de Rede, fabricantes de equipamentos e utilizadores.

2.3.2. Regulação de Cavas de Tensão na Suécia

O regulamento Sueco EIFS 2011:2, de 28 de Abril de 2011, visa definir as condições que devem ser cumpridas para que tensão seja considerada de boa qualidade. O regulamento abrange as

variações de tensão de alimentação, tensões harmônicas, desequilíbrio de tensões, cavas de tensão, oscilações de tensão e simples alterações rápidas de tensão. O regulamento para cavas de tensão e oscilações de tensão é baseado na "curva de partilha de responsabilidade", como foi introduzido no documento de consulta pública sobre qualidade de tensão do ERCEG em 2006. As curvas utilizadas na regulação Sueca são mostradas na Figura 1. Do lado esquerdo da figura é apresentada a curva referente a linhas com tensão nominal de 45 kV ou menos, do lado direito é apresentada a curva referente a linhas de tensão nominal maior que 45 kV.

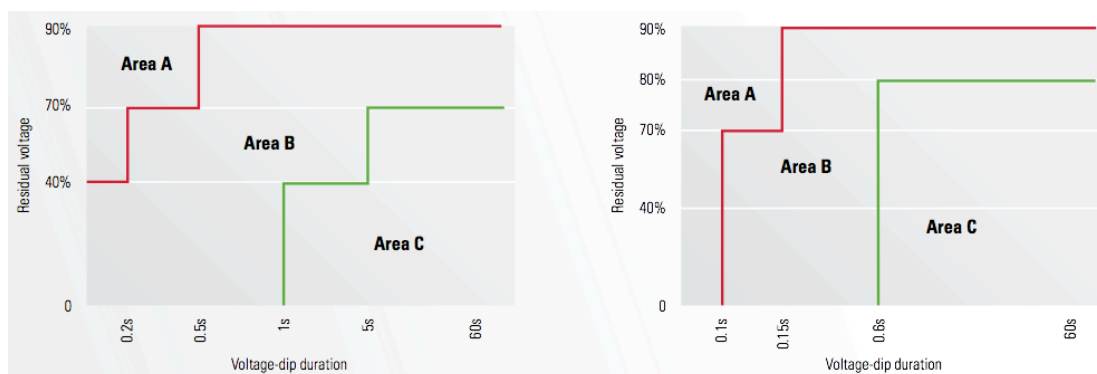


Figura 1: Curvas utilizadas na regulação Sueca [6]

2.3.3. Indicadores para Cavas de Tensão

São necessárias definições claras e consistentes dos índices de cava de tensão de modo a interpretar os resultados das campanhas de medição e aplicar limites eficazmente. O cálculo dos índices de cava de tensão consiste em 3 fases:

1. Cálculo das características da cava (também conhecidas como indicadores de evento simples) a partir da amostra da onda de tensão. Este cálculo é frequentemente realizado por instrumentos de monitorização;
2. Cálculo dos indicadores locais, tipicamente o número de cavas por ano com determinadas características;
3. Cálculo dos indicadores do sistema, por exemplo, o número médio de cavas por ano por local.

2.3.3.1. Características da Cava

As características da cava são calculadas a partir da amostra da forma de onda da tensão. Na maioria dos casos, este cálculo tem lugar no instrumento de monitorização e o utilizador do instrumento não pode influenciar este cálculo.

2.3.3.2. Indicadores Locais

A partir das cavas de tensão gravadas num local ao longo de um período de tipicamente 1 ano, podem ser calculados os indicadores locais. Estes são normalmente o número de cavas de tensão com características dentro de um determinado intervalo. De acordo com a EN 50160, as cavas de tensão devem ser classificadas utilizando a Tabela 1.

Tabela 1: Classificação das Cavas de Tensão de acordo com a norma EN 50160 [6]

Tensão Residual u %	Duração t (ms)				
	$10 \leq t \leq 200$	$200 \leq t \leq 500$	$500 < t \leq 1000$	$1000 < t \leq 5000$	$5000 < t \leq 60000$
$90 > u \geq 80$	CELL A1	CELL A2	CELL A3	CELL A4	CELL A5
$80 > u \geq 70$	CELL B1	CELL B2	CELL B3	CELL B4	CELL B5
$70 > u \geq 40$	CELL C1	CELL C2	CELL C3	CELL C4	CELL C5
$40 > u \geq 5$	CELL D1	CELL D2	CELL D3	CELL D4	CELL D5
$5 > u$	CELL X1	CELL X2	CELL X3	CELL X4	CELL X5

Para cada uma das células da Tabela 1, é apresentado o número de eventos por ano. Para obter este número de eventos, são necessários 2 níveis de agregação: agregação poli-fase (qualquer diferença de tratamento para cavas de tensão em uma, duas ou três fases); e agregação de tempo (qualquer diferença no tratamento de múltiplas cavas com base no tempo decorrido entre estes eventos).

De acordo com a EN 50160, a agregação poli-fase diz respeito à definição de um evento equivalente caracterizado por uma única duração e uma única tensão residual. A interpretação geral disto é que todas as cavas de tensão devem ser tratadas da mesma forma, independentemente da queda de tensão ter ocorrido em uma, duas ou três tensões fase-neutro. No entanto, a formulação na EN 50160 não exclui o cálculo dos Indicadores Locais separados para as cavas de tensão que afectam um número diferente de tensões fase-neutro.

A agregação de tempo continua a ser uma questão de desacordo e um problema que ainda não foi resolvido. Na EN 50160 é dito que "o método utilizado para a agregação de vários eventos pode ser definido de acordo com o uso final dos dados"; outra referência é feita para a norma IEC/TR 61000 2-8. A agregação de tempo é também discutida no CIGRE TB 261 e no CIGRE TB 412. A partir da informação obtida pelo CEER, concluiu-se que nenhuma agregação é usada em nenhuma das pesquisas, com excepção da Itália (transmissão), um mínimo de 0,1 segundos é indicado entre diferentes cavas de tensão. Assim, cada cava de tensão é contada mesmo que ocorra logo após outra cava.

2.3.3.3. Indicadores do Sistema

Quando os Indicadores Locais estão disponíveis num número suficiente de locais, os chamados Indicadores do Sistema podem ser determinados. Os Indicadores do Sistema podem ser a média dos Indicadores Locais sobre todos os locais (com ou sem o uso de factores de ponderação) ou um valor percentual dos Indicadores Locais.

2.4. Principais Perturbações da Qualidade de Energia

Dos diversos problemas que podem afectar a Qualidade de Energia Eléctrica, são de destacar [8]:

- interrupções da alimentação, breves ou longas, com origem na ocorrência de defeitos;
- cavas de tensão, provenientes da ocorrência de defeitos ou da ligação de cargas de grande potência;
- sobretensões transitórias, devido a descargas atmosféricas ou electrostáticas e à realização de manobras de equipamentos;
- desequilíbrio de tensões, devido à distribuição assimétrica das cargas;
- distorção harmónica da tensão, gerada por cargas electrónicas.

Destes, e considerando o âmbito desta dissertação, destacar-se-ão, no capítulo seguinte, as cavas de tensão.

2.4.1. Interrupções

Por definição da norma EN 50160:2010, uma interrupção corresponde a um evento em que a tensão de alimentação no ponto de entrega é inferior a 5% da tensão de referência, podendo ser classificada como prevista ou acidental, consoante seja programada ou não respectivamente, tal como longa ou breve consoante seja de duração superior ou igual a 3 minutos, ou inferior a 3 minutos [9].

2.4.2. Cavas de Tensão

Por definição da norma EN 50160:2010 e segundo o RQS, uma cava de tensão é “diminuição brusca da tensão de alimentação para um valor situado entre 90% e 5% da tensão nominal U_C , seguida do restabelecimento da tensão depois de um curto lapso de tempo. Por convenção, uma cava de tensão dura de dez milissegundos a 1 minuto. O valor de uma cava de tensão é definido como sendo a diferença entre a tensão eficaz durante a cava de tensão e a tensão declarada.”

A duração das cavas de tensão nas redes corresponde ao tempo de eliminação dos defeitos eléctricos, sendo assim, impossível de anular.

2.4.3. Sobretensões

As sobretensões são caracterizadas por um aumento temporário do valor RMS, em determinado ponto do sistema de alimentação eléctrica, acima de um limite especificado, sendo este limite de acordo com a norma EN 50160:2010 igual a 110% da referência [9].

As sobretensões transitórias correspondem a variações extremamente rápidas do valor da tensão, com durações entre os microssegundos e os segundos, podendo atingir valores de pico bastante elevados [8].

2.4.4. Desequilíbrio de Tensões

Um sistema trifásico de tensões é considerado desequilibrado quando as amplitudes das tensões ou os ângulos de fase entre as tensões não são iguais [9].

O método mais rigoroso para o cálculo do desequilíbrio trifásico passa pela componente de decomposição das tensões nas três componentes simétricas, sendo elas, a sequência directa, inversa e homopolar. O desequilíbrio percentual é obtido pela razão entre a componente inversa e componente directa [10]:

$$U_{desvio} (\%) = \frac{U_{inversa}}{U_{directa}} \times 100 \quad (1)$$

2.4.5. Distorção Harmónica de Tensão

As tensões ou correntes harmónicas correspondem a sinais com frequências iguais a múltiplos inteiros da frequência fundamental, que caracterizam a distorção harmónica da tensão ou da corrente num determinado ponto do sistema eléctrico [8].

As harmónicas podem ser avaliadas:

- Individualmente, pela sua amplitude relativa u_h , que é a tensão harmónica relacionada à tensão fundamental u_1 , onde h é a ordem da harmónica [9].
- Globalmente, pelo factor de distorção total (THD) calculado através da seguinte expressão:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} (u_h)^2}}{\sqrt{\sum_{h=1}^{40} (u_h)^2}} \quad (2)$$

3. Cavas de Tensão

3.1. Introdução

As cavas de tensão podem ser caracterizadas de duas formas diferentes:

- a) O início ocorre quando, num determinado ponto da rede, o valor eficaz da tensão de uma ou mais fases cai repentinamente para um valor situado entre 90% e 5% da tensão declarada U_C e termina quando a tensão retoma um valor acima de 90% de U_C acrescido de um valor de histerese (ver Figura 2).

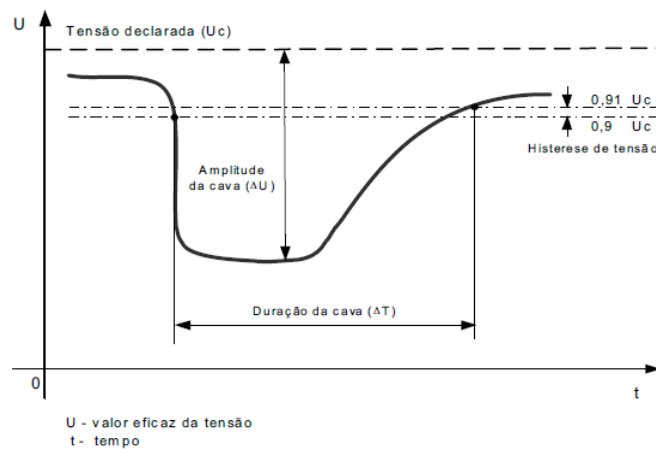


Figura 2: Cava de tensão em função da tensão de declarada [1]

- b) O início ocorre quando, num determinado ponto da rede, o valor eficaz da tensão de uma ou mais fases cai repentinamente para um valor situado entre 90% a 5% da tensão de referência deslizante U_{rd} (valor eficaz da tensão existente imediatamente antes do início da cava) e termina quando a tensão retoma um valor acima dos 90% dessa tensão de referência acrescida de um valor de histerese (relatório técnico CEI 61000-2-8) (ver Figura 3).

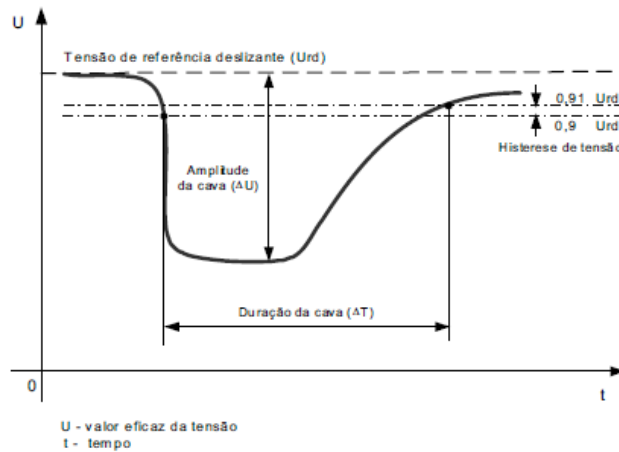


Figura 3: Cava de tensão em função da tensão de referência deslizada [1]

Os valores indicativos para eventos de cavas de tensão são os seguintes [11]:

- Número de cavas de tensão pode variar das dezenas a um milhar por ano;
- Normalmente: Duração < 1 segundo; Amplitude < 60%.

3.2. Origem das Cavas de Tensão

De seguida, são apresentadas algumas das várias origens de ocorrência de cavas de tensão. O foco principal vai para os defeitos nas redes de transporte e distribuição.

Arranque de uma grande carga: Um motor assíncrono absorve no arranque entre 3 a 6 vezes a corrente nominal. O arranque de um grande motor pode provocar um abaixamento de tensão que pode chegar a cava [12].

Magnetização de um grande transformador: Quando se liga um grande transformador, a corrente necessária para o magnetizar é muito elevada. Os utilizadores ligados nas proximidades, podem sentir uma variação da tensão que em alguns casos cabe na categoria de cavas [12].

Cablagens defeituosas: Por exemplo, um aperto defeituoso é uma elevada impedância que origina uma queda de tensão suplementar quando existe uma solicitação de corrente muito elevada [12].

Avárias nos reguladores de tensão: O nível de tensão é regulado automaticamente na distribuição e no transporte por reguladores automáticos. Estes dispositivos são principalmente constituídos por condensadores e transformadores com tomadas variáveis. Estas avárias são no entanto muito pouco prováveis [12].

Defeitos e curto-circuitos na própria instalação: Quando existe um curto-circuito num determinado ponto a tensão cai para valores próximos de zero. No barramento a montante a queda de tensão vai depender da impedância do circuito em defeito e do tempo de actuação das protecções de máxima intensidade. A medida efectiva das correntes de curto-circuito previstas ajudam a dimensionar correctamente as protecções para reduzir a duração das cavas [12].

Defeitos nas redes de transporte e distribuição: A maior parte destes defeitos são entre uma fase e a terra. Têm como origem raios, gelo e neve, contaminação de isoladores, aves, vento, fogos florestais, contactos acidentais, erros de operação, etc. São muito frequentes e imprevisíveis [12].

3.2.1. Defeitos nas Redes de Transporte e Distribuição

Quando ocorre um defeito numa linha de transporte ou de distribuição, devido às mesmas razões que levam a uma interrupção (como queda de árvores, derrube de postes das linhas, etc.), verifica-se um aumento brusco da corrente que provoca uma queda de tensão nas linhas mais próximas, dando assim origem a uma cava de tensão. Estas quedas de tensão ou cavas de tensão têm uma amplitude que decresce proporcionalmente com a distância eléctrica do ponto de observação do local da falha. Ou seja, nos locais mais próximos do defeito as cavas de tensão apresentam uma maior profundidade, diminuindo quando se caminha para linhas mais distantes do defeito.

As redes aéreas, que estão expostas às intempéries, estão sujeitas a um maior número de cavas de tensão que as redes subterrâneas. No entanto, a alimentação de uma rede subterrânea ligada ao mesmo barramento de uma rede aérea ou redes mistas irá sofrer cavas de tensão. Estas cavas de tensão devem-se às falhas que ocorrem nas linhas aéreas.

A ocorrência das cavas de tensão na rede de transmissão (AT e MAT) ou de distribuição (BT e MT) causa uma redução da tensão em todos os utilizadores finais. A duração de uma cava é normalmente condicionada pelo tempo de actuação dos dispositivos de protecção. O isolamento dos defeitos, através de dispositivos de protecção (disjuntores, fusíveis), irá produzir interrupções (longas ou curtas) na alimentação dos utilizadores do sistema da secção onde o defeito ocorreu.

Considerando um defeito numa linha MT, a corrente de curto-circuito através da impedância da linha, dá origem a cavas de tensão que se propagam ao respectivo barramento MT da subestação e conseqüentemente, às restantes linhas adjacentes alimentadas a partir desse barramento. As cavas de tensão podem propagar-se também, embora com atenuação, à rede AT que alimenta a subestação.

A Figura 4 apresenta de seguida os comportamentos da tensão e da corrente numa linha (Saída 1), em defeito, e a propagação das cavas de tensão a uma outra linha (Saída 2), através do barramento MT da subestação.

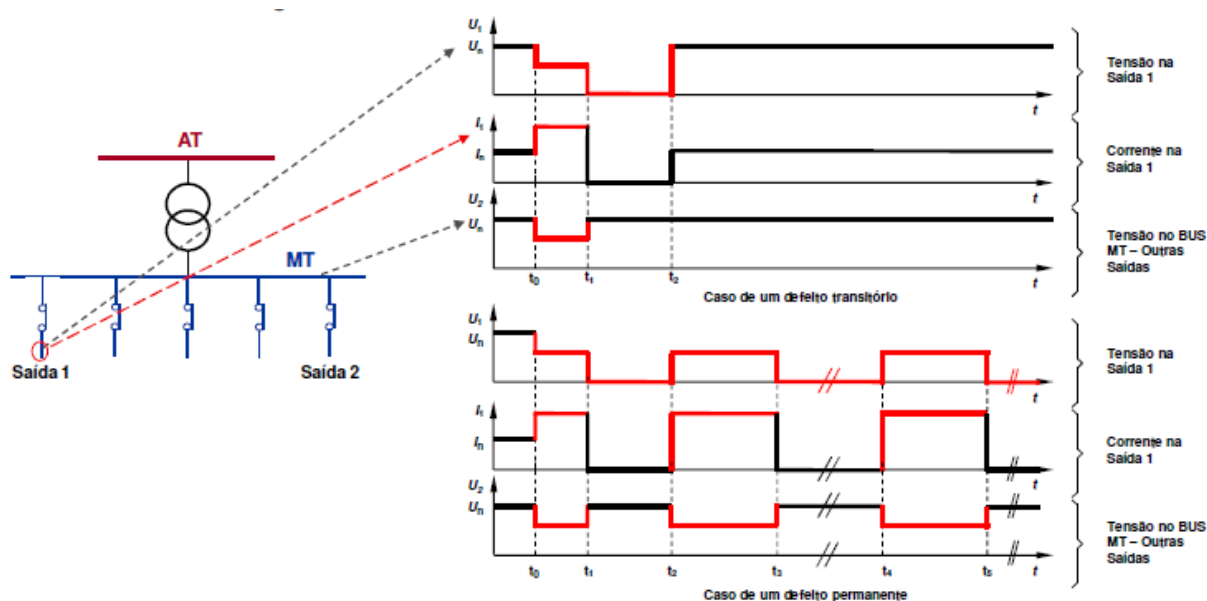


Figura 4: Comportamento da tensão e corrente em linhas de um barramento, sujeito a um defeito nas linhas [11]

Após a actuação dos sistemas de protecção e isolamento do defeito no instante t_1 , a corrente de defeito é anulada e a tensão no barramento de MT recupera os seus valores nominais.

Se o defeito for transitório e se estiverem instalados automatismos de religação rápida, em poucas centenas de milissegundos é retomada a tensão à saída 1 (sem que se verifique qualquer perturbação significativa nas restantes linhas). Desta forma, os consumidores alimentados pela saída 1 são submetidos a uma cava de tensão seguida de uma interrupção breve e todos os outros clientes alimentados através desta subestação (através das restantes linhas) são sujeitos a uma cava de tensão com amplitude aproximadamente igual à amplitude da cava de tensão registada no barramento MT.

Caso se esteja na presença de um defeito permanente, após a actuação dos sistemas de protecção e isolamento no instante t_1 , a corrente de defeito é de facto anulada e a tensão recupera os seus valores nominais. Após isso, é retomada a tensão à saída 1 (t_2), como o defeito é permanente, sucede uma nova corrente de defeito na saída 1, o que irá de novo provocar cavas de tensão no barramento MT e consequentemente na saída 1 e 2. Novamente os sistemas de protecção irão actuar (t_3) provocando o fim da corrente de defeito e o fim da cava de tensão no barramento MT.

Posteriormente é feita uma nova e última tentativa (t_4), que se irá mostrar novamente ineficaz devido à natureza da perturbação.

Após esta última tentativa, os sistemas de protecção deixam a linha da saída 1 em aberto, voltando todas as outras saídas ao seu funcionamento normal.

Uma vez eliminado o curto-circuito, por actuação das protecções correspondentes, e embora os consumidores directamente afectados possam sofrer um prolongamento da ausência de tensão (interrupção longa), esta retorna a valor normal no resto da rede de distribuição. Isto explica o carácter transitório das quedas de tensão observadas e a sua designação habitual de cava de tensão.

3.3. Propagação do Defeito

As cavas de tensão estão intimamente relacionadas com as interrupções, sendo que as cavas de tensão são propagadas entre os vários níveis de tensão através dos transformadores, que ligam esses mesmos níveis.

Considerando o esquema simplificado da Figura seguinte, para análise da propagação de cavas de tensão em sistemas de transporte e distribuição, os pontos 1 a 5 representam zonas em defeito e os pontos A a D representam clientes.

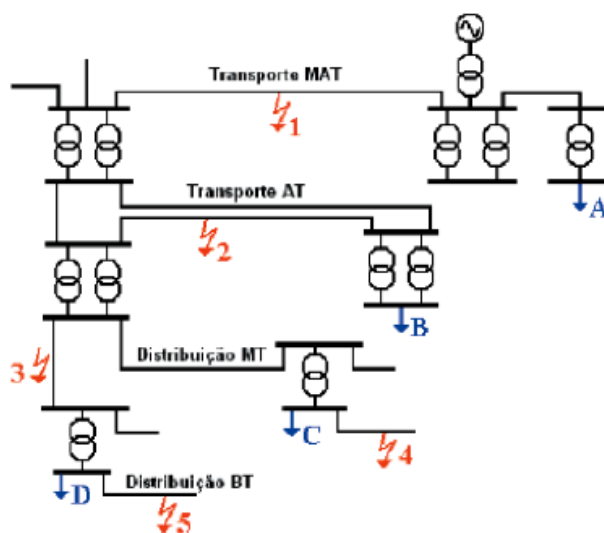


Figura 5: Esquema simplificado dos vários níveis de tensão presentes num sistema eléctrico [8]

Normalmente, os defeitos ao nível dos sistemas MAT, representados pelo ponto 1, afectam todas as subestações alimentadas pelo sistema em causa. Devido a este facto, todos os clientes representados são sujeitos a cavas de tensão. É expectável que o cliente A seja menos afectado, dada a sua proximidade à central geradora.

Um defeito ao nível da rede AT, representado pelo ponto 2, tipicamente tem um impacto reduzido na rede de transporte MAT, não perturbando significativamente o cliente A. No entanto, todos os restantes clientes (B, C e D), a jusante, são sujeitos a cavas de tensão de elevada amplitude.

Um defeito no ponto 3 provoca cavas de tensão de grande amplitude no cliente D, seguidas de interrupção de alimentação. O cliente A não é afectado, o cliente B é sujeito a cavas de amplitude moderada e o cliente C é sujeito a cavas de grande amplitude.

Um defeito no ponto 4 provoca cavas de grande amplitude no cliente C, sendo expectável cavas de amplitude mais moderada no cliente D. Caso o defeito ocorra no ponto 5, a situação inverte-se, ou seja, o cliente D sofre cavas de tensão mais severas que o cliente C. Em ambos os casos, não é de esperar que os clientes A e B sejam afectados [7].

Um conceito muito utilizado neste tipo de análises é o de "área de vulnerabilidade", que identifica quais as áreas e de que forma são afectadas. Este conceito será apresentado com mais detalhe posteriormente neste documento.

3.4. Descrição e Caracterização

Pode-se fazer uma descrição detalhada das diferentes propriedades e características das cavas de tensão. Essa descrição divide a onda de tensão em 3 partes: pré-cava, durante a cava e segmentos de recuperação. É colocada ênfase especial sobre o carácter trifásico e o carácter não-rectangular ocasional das cavas de tensão [14].

Com base nesta descrição detalhada foi criado um resumo de características das cavas de tensão que deve ser utilizado pelos fabricantes de equipamentos e investigadores como uma lista de verificação, durante o desenvolvimento de novos equipamentos.

Para cavas de tensão em sistemas trifásicos é recomendada uma classificação com base no número de tensões fase-neutro que mostram uma queda significativa na magnitude. Os 3 tipos de cavas (Tipo I, Tipo II, Tipo III, ver Figura 6) correspondem a uma queda significativa na amplitude para tensões de uma, duas ou três fase-neutro, respectivamente.

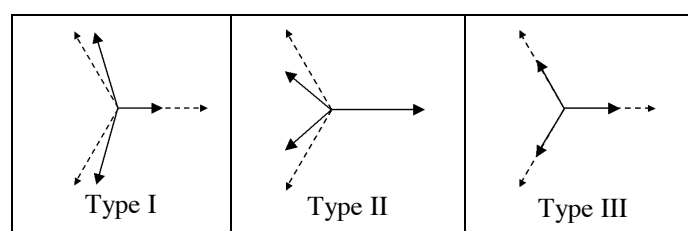


Figura 6: Os três tipos de cavas apresentados para representar a amplitude e desequilíbrio de fases [13]

Embora todos os eventos de cava de tensão sejam caracterizados por uma redução, de curta duração, da amplitude da tensão, as cavas de tensão têm uma ampla variedade de tipos diferentes, onde cavas individuais podem ter características bastante diferentes. Consequentemente, cavas com diferentes características podem afectar equipamentos de formas muito distintas. As duas características básicas para quantificar a gravidade de uma cava de tensão são a sua "tensão residual" e a sua "duração". A definição padrão dessas características é dada pela norma internacional sobre medições de qualidade de energia: IEC 61000-4-30. A tensão residual é o valor mais baixo de todas as tensões eficazes afectadas durante o evento, enquanto que a duração é o tempo total durante o qual a tensão eficaz é inferior a um limiar pré definido.

3.5. Resumo das Características de uma Cava de Tensão

Um resumo das características de uma cava de tensão pode ser utilizado como uma *check list* para uma avaliação rápida da sensibilidade dos equipamentos e processos a cavas de tensão, durante todas as fases de desenvolvimento dos equipamentos e processos. Espera-se que, considerando esta lista de verificação na fase inicial do desenvolvimento de equipamentos, pelo menos, alguns dos futuros problemas de imunidade a cava possam ser evitados; ver Tabela 2.

Tabela 2: Resumo das características de uma cava de tensão [13]

Características dos segmentos pré evento
Valores reais/esperados de pré evento: amplitudes das tensões, ângulos de fase das tensões, harmónicos e outras distorções da forma de onda, desequilíbrios de magnitude/ângulo de fase das tensões e variações de frequência.
Características dos segmentos durante o evento
Amplitude da cava, duração da cava, forma da cava, desequilíbrio da magnitude da cava de tensão, mudança de fase da cava, desequilíbrio do ângulo de fase da cava, distorção da forma de onda da cava e transitórios.
Características dos segmentos de transição
Início da cava, " <i>point-on-wave</i> " do início da cava, mudança de fase no início da cava, " <i>multistage</i> " do início da cava, fim da cava, " <i>point-on-wave</i> " do fim da cava, mudança de fase no fim da cava, " <i>multistage</i> " do fim da cava, taxa de variação da tensão, oscilações amortecidas.
Características dos segmentos de recuperação de tensão (pós evento)
Recuperação da tensão, cava pós defeito (recuperação prolongada da tensão), mudança de fase pós cava, múltiplos eventos de cava (sequência de cavas), eventos de cavas compostos.

3.6. Área de Vulnerabilidade

O conceito de área de vulnerabilidade foi desenvolvido para ajudar a avaliar a probabilidade de equipamentos sensíveis serem submetidos a tensões inferiores ao seu limiar de sensibilidade de tensão. O limiar de sensibilidade de tensão é definido como a amplitude de tensão mínima que um equipamento pode suportar sem pôr em causa o seu adequado funcionamento [10].

A área de vulnerabilidade para cargas sensíveis é essencial para a estimativa do número esperado de cavas de tensão do sistema de energia. Em geral, a área de vulnerabilidade é determinada através da realização de uma análise de curto-circuito em vários pontos nas linhas e nos barramentos [14].

A monitorização é claramente uma forma directa de obter informações sobre o desempenho do sistema. No entanto, o facto de ser necessário um longo período de monitorização de modo a obter uma precisão razoável (tipicamente vários anos) é apontado como uma desvantagem. Como alternativa existe a possibilidade de realizar uma previsão estocástica de cavas de tensão, com base no modelo da rede e nas estatísticas do histórico dos defeitos [15].

Dois métodos estocásticos têm sido usados para a estimativa do número esperado de cavas de tensão (frequência de cavas) dos sistemas de energia.

- **Método da distância crítica:** é uma forma simples de previsão de cavas de tensão com base no divisor de tensão que é facilmente aplicável a uma rede radial. Este método é apenas usado para avaliar sistemas radiais [14].
- **Método de posição de defeitos:** é geralmente adoptado em grandes sistemas em malha. Este exige a modelização da rede eléctrica e simulação de defeitos em locais diferentes ao longo da rede. No entanto, não é claro quanto às regras gerais para determinar a parte da rede que deve ser analisada (parte da rede onde a ocorrência de defeitos produz significativas cavas de tensão) e ao número de defeitos a ser simulado. A precisão deste método depende das posições dos defeitos e do número de defeitos a ser simulados. Para obter uma precisão aceitável, um número bastante elevado de defeitos tem de ser simulado em diferentes posições. Este método permite simular defeitos simétricos usando um modelo único de fase da rede, mas, se necessário, defeitos assimétricos também podem ser simulados através de modelos trifásicos mais complexos [15].

A área de vulnerabilidade para equipamentos sensíveis indica o número de quilómetros total do circuito em que um defeito resultará em cavas de tensão abaixo de um limiar de tensão específico. Na Figura 7 é mostrado um exemplo de uma área de vulnerabilidade para

equipamentos sensíveis nas instalações do utilizador final, esta mostra que quando um defeito (curto-circuito) ocorre em qualquer lugar dentro da área sombreada, o equipamento será afectado devido à cava de tensão resultante [14].

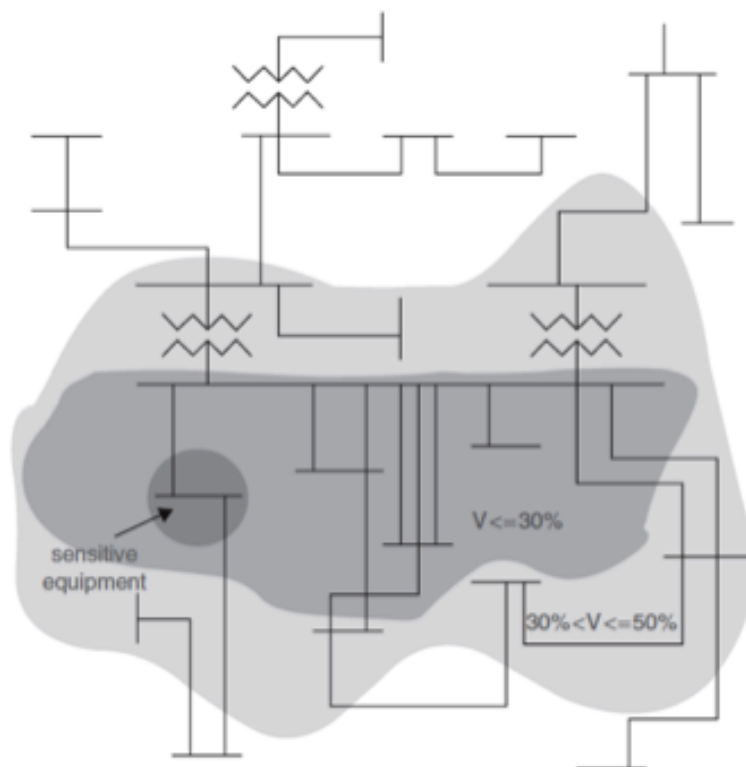


Figura 7: Exemplo de uma área de vulnerabilidade [14]

3.7. Curva de Partilha de Responsabilidade e sua Evolução

O conceito de curva de partilha de responsabilidade é abordado uma vez que algumas normas e regulamentos nacionais (França, Suécia) já incluem o uso deste tipo de curvas. O caso da Suécia, onde a entidade reguladora nacional (*Energy Markets Inspectorate*) introduziu uma evolução deste conceito de curva de partilha de responsabilidades na sua regulação, é abordado de seguida neste documento.

De acordo com as recomendações do ERGEG, dadas ao CENELEC, a revisão da norma EN 50160 deve indicar as responsabilidades de todas as partes interessadas: empresas do sector eléctrico (tanto os operadores de rede de distribuição e transmissão), os utilizadores finais de energia e os fabricantes de equipamentos [16].

A tabela de classificação de cava de tensão introduzida na versão mais recente da norma EN 50160:2010 permite uma forma mais harmonizada de apresentar estes eventos na qualidade de tensão. Além disso, ela também dá a oportunidade de aplicar o conceito de "partilha de

responsabilidade" entre os clientes, fabricantes de equipamentos e operadoras de rede é mostrado na Figura 8 [17].

Algumas normas e regulamentos nacionais (França, África do Sul) já prevêem a criação de um limite entre as cavas de tensão para o qual os aparelhos ou instalações têm de ser imunes e os eventos que podem ser limitados pelos Operadores de Sistema de Distribuição e ser sujeitas à regulamentação da qualidade de tensão. Outras curvas de partilha de responsabilidade possíveis seriam baseadas nas exigências de imunidade dos equipamentos presentes em documentos como SEMI F47 e ITIC (ver subcapítulo seguinte) [18].

Mais recentemente, a entidade reguladora nacional Sueca *Energy Markets Inspectorate* introduziu o regulamento da qualidade de tensão [19]. Esta regulação inclui uma evolução do conceito, através da introdução de uma segunda curva, como mostrado na Figura 9.

Em complemento à Zona A (em termos de tensão residual e duração das cavas de tensão) já define onde as instalações devem ser imunes, a restante área onde a qualidade da regulação de tensão é aplicada foi dividida em dois.

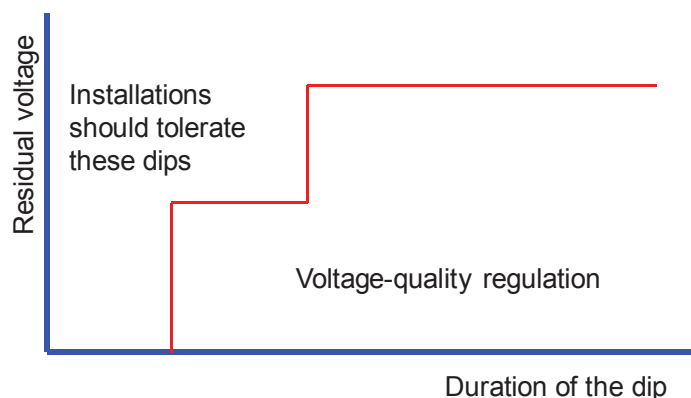


Figura 8: Curva de partilha de responsabilidade [20]

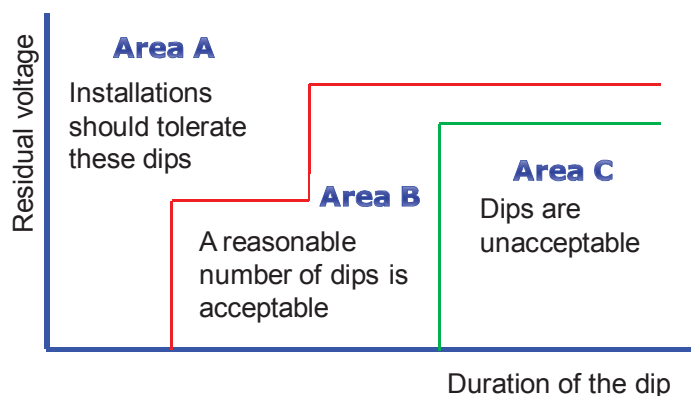


Figura 9: Evolução da curva de partilha de responsabilidade de acordo com o regulamento Sueco [20]

As cavas de tensão com duração superior a certos valores e ultrapassando uma redução de tensão especificada (zona C) são consideradas inaceitáveis e quando tal ocorre a qualidade de fornecimento é considerada insuficiente. Finalmente, uma terceira zona intermediária (zona B) onde foi introduzida, onde um número razoável de cavas de tensão é considerado aceitável. As Figuras 10 e 11 apresentam os limites para a área A, área B e área C, de acordo com a regulamentação Sueca para redes com tensão nominal acima de 45 kV e para redes com tensão nominal de 45 kV ou menos.

Com esta abordagem, o operador de rede deve evitar a ocorrência de cavas na área C e limitar o número de quedas de tensão na área B. Por seu lado, os clientes devem garantir que seus processos e equipamentos são imunes a cavas de tensão na área A e assegurar que o impacto das cavas na área B é limitado. Os fabricantes de equipamentos devem assegurar que seu equipamento seja imune a cavas na área A e devem assegurar que as diferentes classes de imunidade dos equipamentos são capazes de cobrir a área B.

Área A: cavas moderadas. Não é suposto haver qualquer impacto negativo nos equipamentos ou nas instalações. Estas cavas são consideradas como uma parte normal do funcionamento do sistema de energia eléctrica. Os equipamentos e as instalações devem ser imunes a estas cavas de tensão e limites quanto ao número de cavas de tensão não são definidos neste grupo. As cavas de tensão neste grupo são adicionadas a estatísticas de rápidas variações de tensões [19].

Área B: cavas com uma duração e tensão residual entre os dois limites. O número de cavas neste grupo não deve ser superior ao alcançável com a tecnologia do estado de arte e a custos razoáveis. Não são definidos limites absolutos quanto ao número das cavas de tensão estabelecidas nesta região no plano amplitude-duração. O que deve ser visto como qualidade suficiente depende fortemente das circunstâncias locais. É ainda reconhecido que deve ser feita a distinção entre quedas de tensão em uma, duas e três fases, fase-fase ou tensões fase-neutro [19].

Área C: cavas severas que apontam para sérios problemas com a operação do sistema de energia eléctrica. Quando uma cava de tensão ocorre neste grupo, a tensão é considerada de qualidade insuficiente [19].

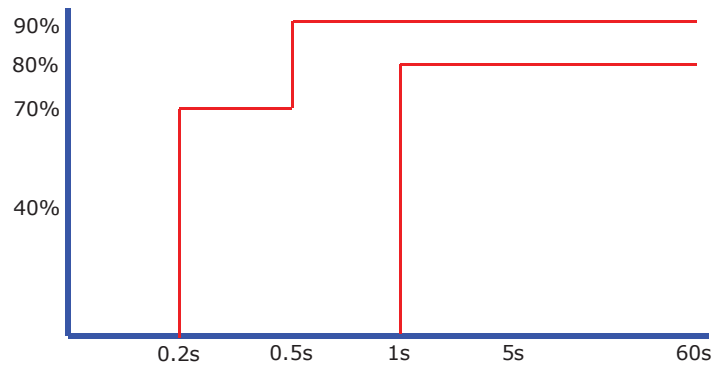


Figura 10: Limites de acordo com o regulamento Sueco para redes acima de 45 kV [20]

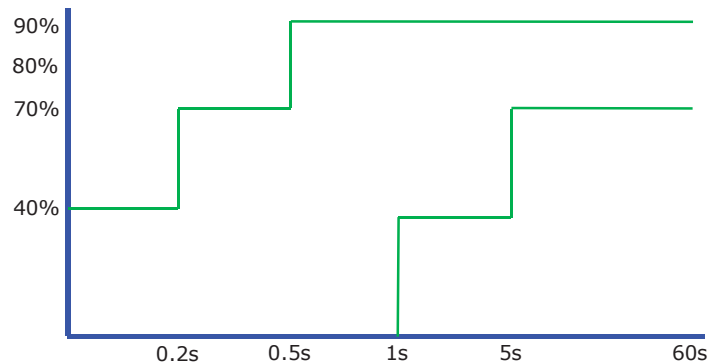


Figura 11: Limites de acordo com o regulamento Sueco para redes de 45kV ou menos [20]

3.8. Imunidade das Cargas Sensíveis às Cavas de Tensão

Como já referido anteriormente, alguns equipamentos terão um mau funcionamento caso a tensão de alimentação se situe abaixo de certos níveis de tensão para uma duração fixa. Esta informação é geralmente fornecida sob a forma de uma curva de tolerância de tensão dos equipamentos cuja forma é mostrada na Figura 12. Esta Figura mostra de uma forma genérica a curva de tolerância de tensão típica de um equipamento.

Embora tenha sido discutida a necessidade de outros parâmetros de caracterização das cavas de tensão, a sensibilidade dos equipamentos às mesmas é geralmente expressa apenas em termos da amplitude e duração das cavas de tensão e designada por curva de tolerância de tensão. Para este fim, a curva de tolerância rectangular de tensão é utilizada, indicando que a queda de tensão mais profunda do que amplitude de tensão especificado (V_{min}) e duração maior do que a duração especificada (t_{max}) irá resultar em perturbações ao funcionamento do equipamento [21].

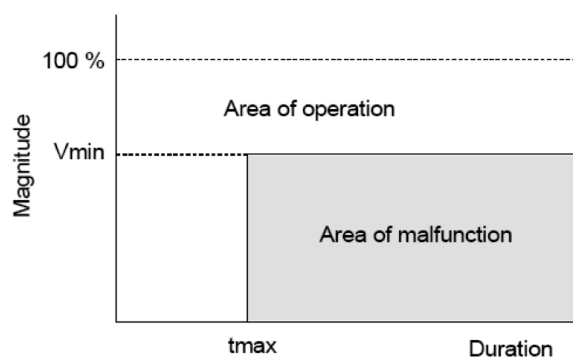


Figura 12: Curva de tolerância de um equipamento [21]

Deste modo, é apresentada a sensibilidade do equipamento através da sua curva de tolerância de tensão. Duas curvas de tolerância de tensão popularmente usadas são a curva ITIC (*Information Technology Industry Council*) e a curva SEMI F47. Estas curvas são mostradas na Figura 13 e Figura 14. O gráfico da Figura 12 indica o tempo que o equipamento é capaz de suportar uma cava de respectiva profundidade sem ter como consequência o seu mau funcionamento [21].

Relativamente à curva ITIC, esta representa os requisitos de tolerância a variações de tensão de equipamentos informáticos, tal como definido pelo ITIC, anteriormente conhecido como CBEMA [21]. No que toca à antiga curva CBEMA, esta tornou-se conhecida quando a *Computer Business Equipment Manufacturers Association* começou a usar a curva como uma recomendação para os seus membros. A curva foi posteriormente incluída numa norma IEEE e tornou-se numa referência para a tolerância de tensão dos equipamentos bem como para a severidade das cavas de tensão. Em 2000 foi revista passando a ser chamada de curva ITIC [13]. No entanto estas curvas não podem ser consideradas como referência no sector eléctrico, dado que foram definidas unilateralmente sem ter em consideração os contributos dos restantes *stakeholders*.

Na Figura 13 temos estas duas curvas como termo de comparação. A curva ITIC apresenta requisitos um pouco mais rígidos do que a curva CBEMA [7].

Na Figura 14 temos a curva da SEMI que especifica a imunidade a cavas de tensão de equipamentos de fabrico de semicondutores [21].

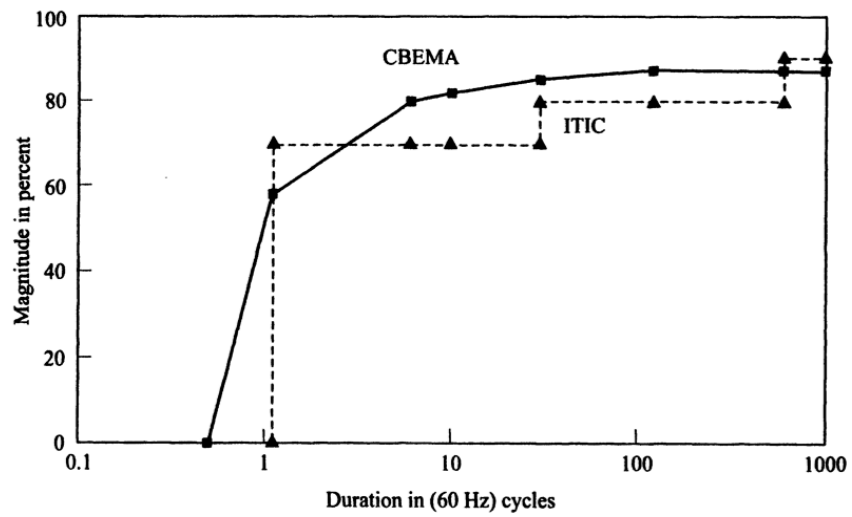


Figura 13: Curva CBEMA e curva revista, ITIC [7]

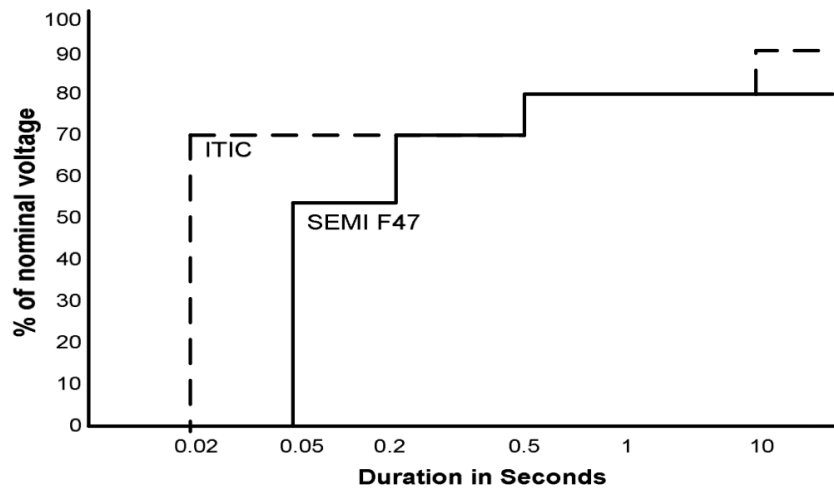


Figura 14: Curva ITIC e curva SEMI F47 [21]

4. Estudo da Ocorrência de Cavas de Tensão, Métodos para a sua Prevenção e Soluções para Imunização

4.1. Estudo para uma linha de 30 kV

Neste subcapítulo será feita a análise da Qualidade de Energia Eléctrica num determinado ponto de uma linha aérea de Média Tensão, 30 kV.

A Tabela 3 mostra os dados da monitorização da qualidade da onda de tensão num saída de um barramento de 30 kV, divididos em três campos: tipo, duração e amplitude da cava de tensão.

Tabela 3: Dados das cavas de tensão na linha de 30 kV

Tipo	Duração (ms)	Amplitude (kV)
Cava de Tensão Trifásica	50,124	26,25
Cava de Tensão Trifásica	153,460	8,13
Cava de Tensão Trifásica	66,558	25,55
Cava de Tensão Trifásica	40,060	26,88
Cava de Tensão Trifásica	50,007	26,88
Cava de Tensão Trifásica	59,985	26,81
Cava de Tensão Trifásica	369,750	26,15
Cava de Tensão Trifásica	99,975	13,91
Cava de Tensão Trifásica	697,140	20,86
Cava de Tensão Trifásica	59,885	23,04
Cava de Tensão Trifásica	63,343	22,22
Cava de Tensão Trifásica	59,939	26,84
Cava de Tensão Trifásica	250,05	26,81
Cava de Tensão Trifásica	100,030	26,82
Cava de Tensão Trifásica	50,020	26,29
Cava de Tensão Trifásica	63,465	24,27
Cava de Tensão Trifásica	63,518	23,62
Cava de Tensão Trifásica	59,937	23,08
Cava de Tensão Trifásica	63,347	23,49
Cava de Tensão Trifásica	415,810	19,20
Cava de Tensão Trifásica	53,401	23,61
Cava de Tensão Trifásica	63,351	23,63
Cava de Tensão Trifásica	49,988	25,78
Cava de Tensão Trifásica	49,890	25,98
Cava de Tensão Trifásica	89,876	26,61
Cava de Tensão Trifásica	29,990	26,83
Cava de Tensão Trifásica	50,000	23,95

Após a leitura dos dados procedeu-se à análise dos registos de cavas através de uma folha de cálculo do Microsoft Excel. No que diz respeito à análise dos eventos de cavas de tensão através do Excel, foi criada uma tabela de acordo com os parâmetros mínimos de tensão definidos pela

norma europeia EN 50160:2010. Como se pode verificar na Tabela 4. Foi também criado um gráfico, onde podemos ver a Tensão Residual, do ponto de vista linha, e Duração do defeito, como se verificar na Figura 15.

Introduzindo o número de eventos de cavas de tensão na nova tabela de classificação de cavas de tensão da norma EN 50160:2010 e tendo em conta a curva de partilha de responsabilidade existente no regulamento Sueco, construiu-se a Tabela 4, que se apresenta com diferentes cores para as três diferentes classes. Obtemos então a seguinte tabela:

Tabela 4: Classificação dos dados das curvas de tensão de acordo com a norma EN 50160:2010

Tensão Residual u [%]	Duração [ms]				
	10-200	200-500	500-1000	1000-5000	5000-60000
$90 > u \geq 80$	0%	0%	0%	0%	0%
$80 > u \geq 70$	4%	0%	0%	0%	0%
$70 > u \geq 40$	4%	0%	0%	0%	0%
$40 > u \geq 5$	78%	11%	4%	0%	0%
$5 > u$	0%	0%	0%	0%	0%

Num total de 27 eventos de cavas de tensão medidos, 2 delas correspondem à Área A da tabela de classificação de cavas de tensão, 25 correspondem à Área B e para a Área C não houve qualquer registo.

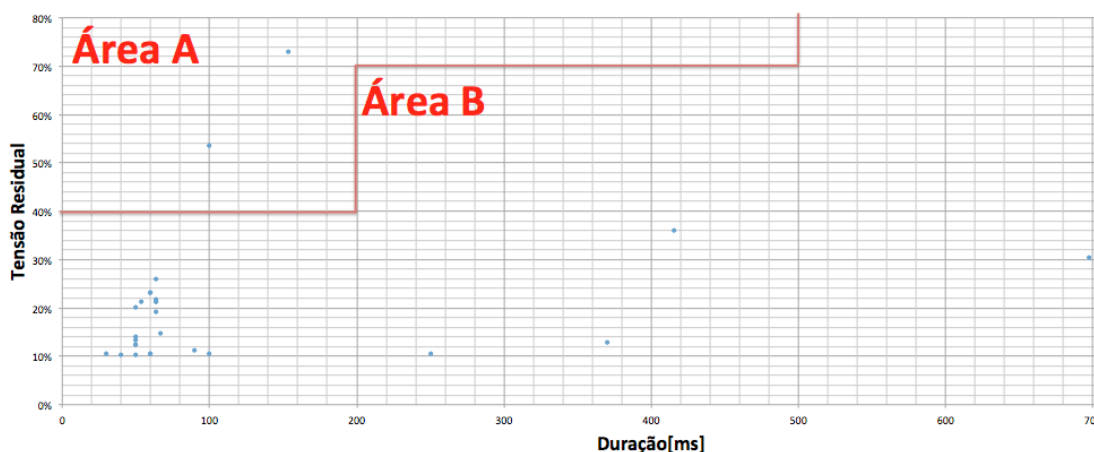


Figura 15: Tensão residual e duração do defeito na linha de 30 kV

Fazendo a análise da tabela e figura anteriores, podemos verificar que a maior parte dos eventos de cavas de tensão correspondem à Área B. Idealmente, a maioria destes eventos deveria corresponder à Área A. Isso faria com que o número de clientes afetados fosse menor.

Serão apresentados métodos para prevenção deste tipo de eventos, mais à frente neste documento.

4.2. Estudo para uma Instalação Industrial alimentada por uma linha de 30 kV

Neste subcapítulo será feita a análise da Qualidade de Energia Eléctrica entregue a uma Instalação Industrial alimentada por uma linha aérea de Média Tensão, 30 kV.

Os dados da monitorização da qualidade da onda de tensão foram retirados de [12]. A Tabela 5 mostra os dados referidos anteriormente, divididos em três campos. Data e hora, duração e amplitude da cava de tensão.

Tabela 5: Dados das tensões no ponto de entrega à instalação [12]

Data e hora	Duração (seg)	Valor extremo(%)	Data e hora	Duração (seg)	Valor extremo(%)	Data e hora	Duração (seg)	Valor extremo(%)
23-2-03 7:50	0,541	84,6	17-7-03 9:03	0,400	88,1	9-11-03 6:45	0,059	86,5
26-2-03 8:50	0,459	83,0	1-8-03 18:32	0,078	81,9	15-11-03 6:50	0,039	87,9
26-2-03 8:54	0,161	86,3	1-8-03 18:32	0,327	65,5	15-11-03 23:39	0,054	87,6
17-3-03 9:10	0,420	87,1	2-8-03 15:11	0,122	47,7	16-11-03 2:01	0,068	87,4
26-3-03 20:27	0,420	86,0	2-8-03 17:47	0,098	85,4	16-11-03 2:55	0,078	86,3
1-4-03 8:25	0,439	83,1	2-8-03 17:47	0,093	87,2	16-11-03 5:31	0,068	87,5
1-4-03 21:25	0,444	87,6	2-8-03 17:54	0,093	72,1	16-11-03 5:43	0,078	86,1
2-4-03 2:27	0,380	88,6	2-8-03 17:56	1,161	69,5	16-11-03 5:43	0,073	87,6
2-4-03 3:23	0,361	88,2	3-8-03 18:26	0,059	87,9	16-11-03 7:27	0,093	85,6
22-4-03 6:56	0,458	86,7	4-8-03 12:02	0,220	87,0	19-11-03 11:00	0,020	88,2
22-4-03 15:55	0,161	85,0	7-8-03 17:37	0,049	86,0	30-11-03 10:28	0,098	88,3
6-5-03 1:12	0,454	87,2	22-8-03 8:00	0,029	89,9	30-11-03 10:59	0,078	88,9
8-6-03 10:00	0,259	41,0	22-8-03 8:17	0,029	88,9	30-11-03 10:59	0,059	89,2
29-6-03 14:52	1,473	79,6	23-8-03 8:01	0,029	89,5	30-11-03 11:00	0,059	89,1
29-6-03 14:55	0,210	83,4	25-8-03 8:53	0,493	7,5	30-11-03 11:02	0,190	88,9
29-6-03 15:34	0,478	80,3	27-8-03 9:03	0,059	82,1	30-11-03 11:10	0,083	88,5
29-6-03 15:55	0,478	78,9	27-8-03 9:06	0,151	68,9	1-12-03 7:59	0,610	20,3
29-6-03 17:03	0,400	83,0	1-9-03 2:56	0,112	87,8	1-12-03 8:38	0,771	83,0
29-6-03 17:07	0,463	82,9	2-9-03 14:23	0,063	78,8	9-12-03 12:30	0,220	86,7
29-6-03 17:08	0,478	81,1	2-9-03 14:24	0,073	83,6	9-12-03 13:05	0,210	88,2
29-6-03 18:27	0,459	82,7	21-9-03 4:33	0,049	87,4	9-12-03 15:47	0,229	85,4
29-6-03 18:32	0,468	78,6	21-9-03 6:08	0,059	85,8	9-12-03 16:31	0,220	86,8
29-6-03 18:40	0,468	82,2	30-9-03 14:28	0,278	11,8	21-12-03 16:34	0,039	89,6
29-6-03 19:14	0,468	83,6	1-10-03 4:13	0,122	88,3	23-12-03 21:59	0,054	85,1
11-7-03 9:10	0,229	76,3	1-10-03 7:33	0,112	87,3			
11-7-03 9:10	1,351	43,4	27-10-03 4:55	0,532	87,5			
11-7-03 9:10	6,590	110,2	27-10-03 8:01	0,059	87,3			
11-7-03 9:13	0,102	78,6	28-10-03 14:15	0,229	87,3			
17-7-03 9:02	1,259	84,0	9-11-03 6:45	0,054	86,6			

Assim como no caso anterior foram criados uma tabela e um gráfico de acordo com a norma EN 50160:2010 e com a curva de partilha de responsabilidade presente no regulamento Sueco. Ver Tabela 6 e Figura 16.

Tabela 6: Classificação dos dados das curvas de tensão de acordo com a norma EN 50160:2010

Tensão Residual u [%]	Duração [ms]				
	10-200	200-500	500-1000	1000-5000	5000-60000
$90 > u \geq 80$	0%	1%	0%	0%	0%
$80 > u \geq 70$	0%	0%	1%	0%	0%
$70 > u \geq 40$	1%	1%	0%	1%	0%
$40 > u \geq 5$	51%	35%	4%	4%	0%
$5 > u$	0%	0%	0%	0%	0%

Num total de 80 eventos de cavas de tensão medidos, dois deles correspondem à Área A da tabela de classificação de cavas de tensão, 74 correspondem à Área B e 4 correspondem à Área C.

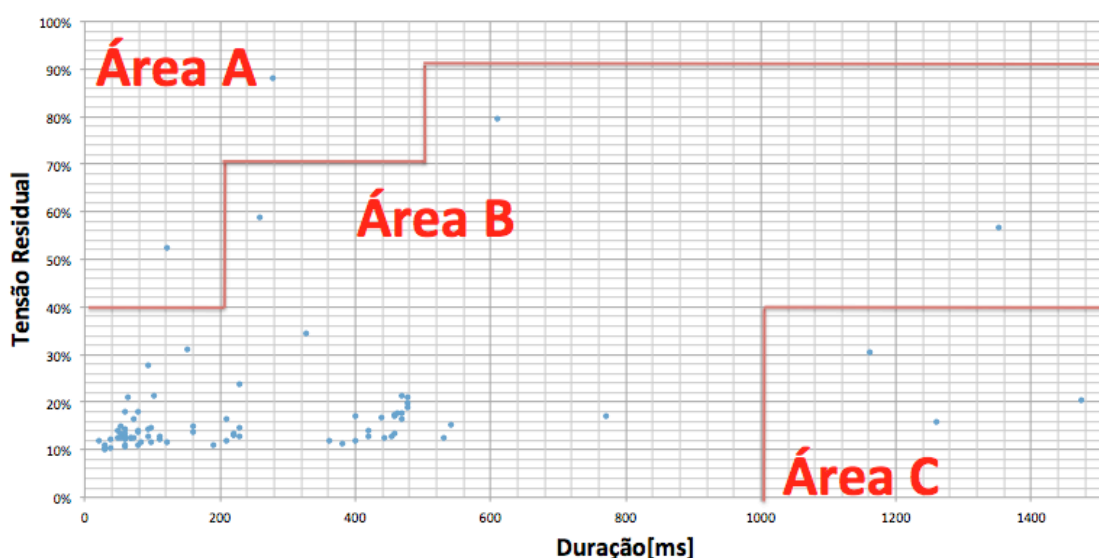


Figura 16: Tensão residual e duração do defeito no ponto de entrega da instalação

Tal como caso anterior, a maioria dos eventos de cavas de tensão registados corresponde à Área B. Este caso tem a particularidade de apresentar eventos de cavas de tensão correspondentes à Área C, sendo estes totalmente inaceitáveis.

Serão apresentadas algumas soluções a nível do utilizador final de modo a imunizar os seus equipamentos aquando da ocorrência deste tipo de eventos, mais à frente neste documento.

4.3. Prevenção de Cavas de Tensão na Óptica do Distribuidor

Do ponto de vista do Distribuidor de Energia existe um vasto leque de opções para a prevenção de ocorrência de cavas de tensão.

A principal área de incisão com vista a prevenção será a manutenção das linhas, principalmente nas redes de Transporte e Distribuição. A manutenção deste tipo de linha pode ser feita das seguintes formas [22]:

- poda de árvores: Este é um método muito eficaz para reduzir o número de defeitos em linhas aéreas, principalmente linhas em zonas florestais. No entanto as populações podem queixar-se por razões ambientais e/ou estéticas;
- limpeza dos isoladores: A limpeza dos isoladores pode ser necessária, por exemplo, em zonas costeiras ou de muito pó. De outra forma existe uma grande possibilidade de criação de arcos eléctricos formados nos isoladores, mesmo em situações de chuva fraca e com ausência de relâmpagos;
- cabos blindados (embora, nenhuma blindagem seja 100% eficaz);
 - protecção contra descargas atmosféricas;
 - devem ser utilizados preferencialmente em zonas de forte incidência de trovoadas.
- cabos subterrâneos: Outra forma de reduzir o número de problemas é o aumento do número de linhas subterrâneas. Apesar do seu custo elevado, oferecem uma maior fiabilidade, podendo ser uma solução para linhas com necessidade de alta fiabilidade;
- melhorar o sistema de terras
- alterar a distância entre os condutores;
- utilização de condutores isolados.;
- utilização de “*Line Arresters*”: São colocados de dois em dois ou três em três postes ao longo da linha, e servem para desviar a corrente em excesso provocada pela descarga de relâmpagos nas linhas. Alguns sistemas de energia colocam-nos em todas as três fases, enquanto outros apenas os colocam na fase em que é mais provável a queda do relâmpago.

É importante realçar que nenhuma destas medidas, por si só, resolverá todos os problemas.

Deve ser estudado cada caso, individualmente, de forma a adoptar a melhor solução.

Relativamente aos cabos blindados temos as seguintes particularidades:

- as técnicas de prevenção de defeitos nestes cabos estão geralmente relacionados com a prevenção do isolamento contra sobretensões;
- o isolamento tem tendência a degradar-se significativamente com a idade, o que requer esforços crescentes com vista a manter o cabo em boas condições;

– dado que todos os defeitos em cabos são uma situação permanente, a questão da Qualidade de Energia resume-se, neste caso, à localização rápida do defeito ocorrido para que se possa então proceder ao seu seccionamento manual e posteriormente fazer a sua reparação.

Na Figura 17 podemos ver um dos exemplos de manutenção de uma linha aérea.



Figura 17: Exemplo da poda de árvores numa zona florestal [22]

A Figura 18 mostra um barramento MT de uma subestação afectado por um defeito numa das suas saídas (Saída 1). De seguida, na Figura 19 estão ilustradas as tensões e correntes dessa saída logo após a ocorrência do defeito, assim como as tensões da saída imediatamente a seguir (Saída 2). As linhas a vermelho ilustram a propagação de cavas de tensão provocada por um defeito na Saída 1

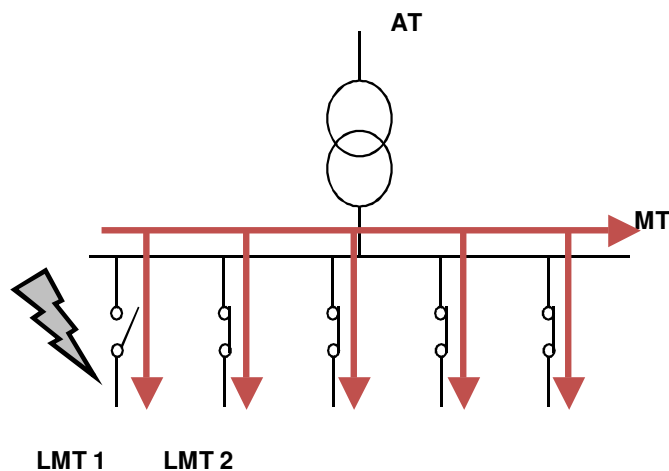


Figura 18: Barramento de Média Tensão com defeito na Saída 1 [1]



Figura 19: Tensões e correntes relativas à Figura 18 [1]

Tendo em vista a redução do número e severidade das cavas tensão, mais algumas medidas podem ser adoptadas nas linhas de Transporte e Distribuição. Exemplos dessas medidas são apresentados de seguida.

Aumento da potência de curto-circuito: Quanto maior for a potência de curto-circuito, em determinado ponto da rede, menor será a propagação de cavas de tensão até esse ponto. Assim, irá reduzir a área afectada, reduzindo também o número de cavas e a sua amplitude.

Optimização do tempo de eliminação de defeitos: Tendo em consideração que a duração das cavas de tensão corresponde ao tempo de extinção dos defeitos, é fundamental otimizar esse tempo de forma a reduzir a duração das cavas de tensão, sem comprometer a selectividade do sistema. Para tal deve-se aperfeiçoar o desempenho dos dispositivos eléctricos de protecção.

Disjuntores de derivação: Para as impedâncias do sistema de energia de neutro ligado a terra, os distribuidores podem também substituir o dispositivo de refeito automático por disjuntores de derivação. Estes apresentam uma maior vantagem por não causarem interrupções na alimentação onde ocorre a avaria na altura do transitório da falha à terra (reduz o número de pequenas interrupções). Os disjuntores permitem a extinção de transitórios provocados pela falha à terra, através do cancelamento da tensão aos terminais da falha com duração superior a 300ms.

Separação dos barramentos nas subestações: Se se separar um barramento em dois, com a introdução de mais um transformador de distribuição para esse novo barramento, pode-se separar as linhas problemáticas das restantes. Desta forma a cava de tensão sentida nas linhas não problemáticas, aquando de um defeito, é bastante menor do que se tivessem ligadas ao mesmo barramento, ver Figura 20.

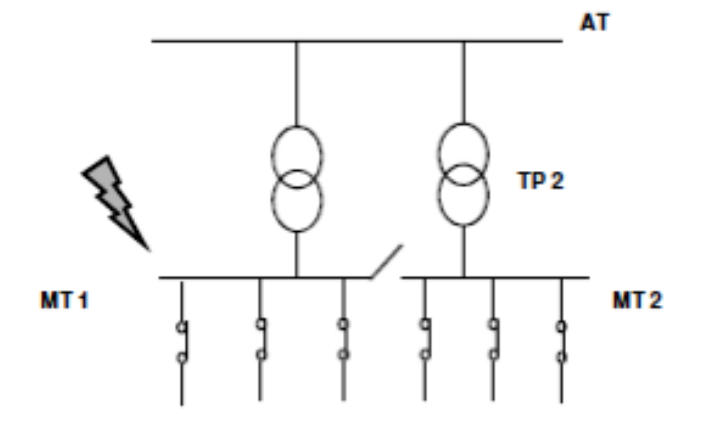


Figura 20: Separação dos barramentos numa subestação [1]

4.4. Soluções para Imunização de Equipamentos na Óptica do Utilizador Final

Têm sido desenvolvidos vários métodos para aumentar a imunidade dos equipamentos às quedas de tensão. Condicionadores de energia em grande escala, tais como *static series compensators* (SSC) e *backups* através de fontes de armazenamento de energia, protegem toda a instalação contra as perturbações eléctricas, mas o custo é elevado, não sendo justificáveis em determinadas aplicações.

Condicionadores de energia de tamanho adequado e estrategicamente colocados podem também ser usados para proteger todo o equipamento ou secções únicas deste. Existem também equipamentos de processos que podem ser protegidos ao nível de controlo através do uso de pequenos condicionadores de energia ou substituição de componentes. A protecção contra cavas e interrupções breves também pode ser incorporada nos equipamentos sem o uso de condicionadores de energia. Isto é feito através dos benefícios do projecto, usando componentes robustos e técnicas de programação modificada.

Todos os métodos para aumentar a capacidade de resistência do equipamento a perturbações de QEE, a partir de soluções de macro escala implementadas ao nível da transmissão ou da distribuição até às soluções integradas têm vantagens e desvantagens.

As soluções aplicadas ao nível do equipamento exigem um conhecimento extenso de cada parte do mesmo, podendo as soluções integradas aumentar o seu custo inicial. No entanto, é geralmente aceite que as soluções integradas são o melhor método para melhorar a imunidade do equipamento a cavas de tensão [23].

As soluções para melhorar a fiabilidade e o desempenho de um processo ou de uma instalação podem ser aplicadas em diferentes níveis. As diferentes tecnologias disponíveis devem ser avaliadas com base nos requisitos específicos do processo para determinar a melhor solução para melhorar o desempenho global perante cavas de tensão. As soluções podem ser discutidas nos níveis de aplicação seguintes [10].

- Protecção para cargas pequenas (por exemplo, menos de 5 kVA) o que geralmente envolve a protecção de equipamentos de controlo ou de pequenas máquinas individuais.
- Protecção para equipamentos individuais ou para grupos de equipamentos até cerca de 300 kVA. Representa a aplicação de tecnologias de condicionamento de energia dentro das instalações para protecção de equipamentos críticos que podem ser agrupados convenientemente. Uma vez que de um modo geral nem todas as cargas na indústria têm necessidade de protecção, este facto pode ser um método vantajoso para as cargas críticas, especialmente se a necessidade para a protecção dessas cargas for abordada na fase de concepção da instalação.
- Protecção para grandes grupos de cargas ou instalações ao nível de toda a rede de baixa tensão. Às vezes, quando existe uma grande parcela da instalação que é crítica ou que necessita de protecção, é razoável pensar em proteger grandes grupos de cargas numa localização conveniente (normalmente na entrada da instalação).
- Protecção ao nível da média tensão ou a nível do sistema de fornecimento. Se toda a instalação precisa de protecção ou de energia com grande qualidade, devem ser consideradas as soluções ao nível de média tensão.

As gamas de tamanhos das tecnologias de condicionamento para os respectivos locais de aplicação, são dependentes das potências dos níveis em questão, podendo muitas das tecnologias ser aplicadas sobre uma ampla gama de tamanhos. De seguida são dados alguns exemplos das principais tecnologias disponíveis:

- *Dynamic Voltage Restorer*;
- Sintetizadores magnéticos;
- *Active Voltage Conditioner*;
- *Dynamic Sag Corrector*;
- *DynaCom* Trifásico;
- *Uninterruptible Power Supply* (UPS);
- Etc.

5. Método para a Localização de Defeitos: Relação Tensão Residual / Distância ao Defeito

5.1. Descrição do Método

No decorrer deste estudo foram utilizados conceitos como:

- Cálculo de correntes de curto-circuito, pelo método das impedâncias;
- Curto-circuitos trifásicos simétricos.
- Tensão residual;
- Distância ao defeito.

Estabeleceu-se para este estudo uma rede simplificada, constituída por uma fonte de alimentação AC, um interruptor, uma impedância de curto-circuito (Z_{CC}) (que representa todas os elementos da rede a montante do interruptor) e a impedância do defeito (Z_S) (Figura 21).

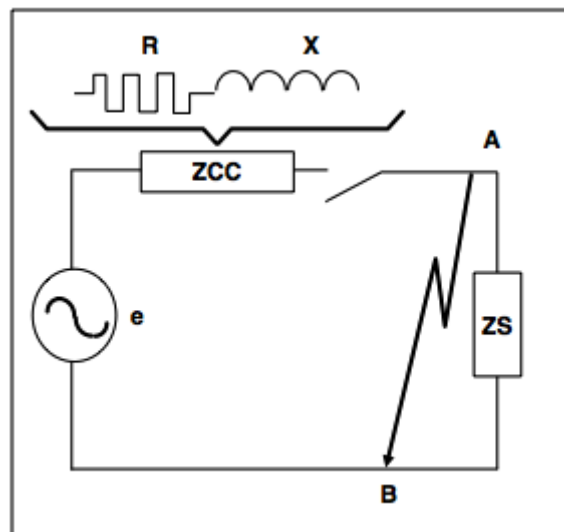


Figura 21: Rede simplificada

Existem vários tipos de correntes de curto circuito, são eles os seguintes:

- Curto-circuito trifásico simétrico;
- Curto-circuito monofásico;
- Curto-circuito bifásico;
- Curto-circuito monofásico à massa.

Como referido anteriormente, apenas foi considerado o curto-circuito trifásico simétrico, como se pode ver na Figura 22.

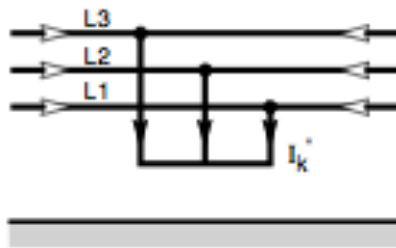


Figura 22: Curto-circuito trifásico simétrico [24]

A corrente quando ocorre um curto-circuito trifásico é igual a [24]:

$$I_{CC_3} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{eq}} \quad (3)$$

O cálculo da corrente de curto-circuito, requer apenas o cálculo de Z_{eq} , a impedância equivalente a todas as impedâncias percorridas pela corrente de curto-circuito desde o gerador até à localização do defeito, ou seja, a impedância a montante do nosso barramento e a impedância das linhas.

A impedância Z_{eq} , será então composto por dois termos:

- Z_{cc} ;
- $Z_{linha} (\Omega / km)$.

Para calcularmos a impedância num determinado ponto da linha temos que:

$$|Z'_{linha}| = \sqrt{R'^2_{linha} + X'^2_{linha}} \quad (4)$$

Em que:

$$R'_{linha} = R_{linha} \cdot D \quad (5)$$

$$X'_{linha} = X_{linha} \cdot D \quad (6)$$

Onde D = distância entre o barramento e o ponto da linha desejado.

O valor do módulo de Z_{eq} então é dado pela seguinte expressão:

$$|Z_{eq}| = \sqrt{(\sum R)^2 + (\sum X)^2} \quad (7)$$

Onde:

- $\sum R$ = soma das resistências;
- $\sum X$ = soma das reactâncias.

Assumindo então um defeito trifásico simétrico, podemos utilizar como referência os dados da Figura 23.

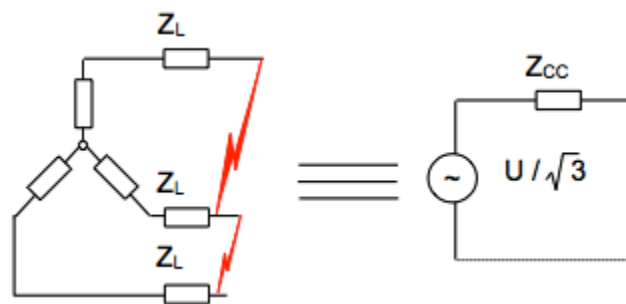


Figura 23: Defeito trifásico simétrico

Como referido anteriormente, Z_{cc} , é impedância a montante do barramento pode ser calculada da seguinte forma [24]:

$$Z_{cc} = R_{cc} + jX_{cc} \quad (8)$$

Em que:

$$R_{cc} = 0,1Z_{cc}' \quad (9)$$

$$X_{cc} = 0,995Z_{cc}' \quad (10)$$

O módulo de Z_{cc}' é calculado tendo em conta a tensão nominal da linha (U_n) e a potência de curto-circuito ($S_{CC_{MT}}$) do barramento de Média Tensão. Assim sendo,

$$|Z_{cc}'| = \frac{U_n^2}{S_{CC_{MT}}} \quad (11)$$

Finalmente, temos que calcular a tensão residual (U_r) vista pelo barramento de Média Tensão após a ocorrência do defeito. Para isso, utiliza-se a seguinte expressão:

$$U_r = I_{cc_3} \cdot Z'_{linha} \cdot \sqrt{3} \quad (12)$$

Para a realização deste estudo foram utilizados dados provenientes do IEEE 37 *Node Test Feeder*.

Como os dados presentes no referido documento se apresentavam na forma $\Omega / milha$, teve de ser feita uma conversão para Ω / km , utilizado um factor de multiplicação igual a 0,62137.

Com o auxílio de uma folha de cálculo de Microsoft Excel foram simulados quatro casos distintos, com a utilização dos seguintes dados:

- $U_n = 30 \text{ kV}$;
- $S_{CC_{MT1}} = 500 \text{ MVA}$ e $S_{CC_{MT2}} = 700 \text{ MVA}$;
- $Z_{linha1} (\Omega / milha) = 0,2926 + j0,1973$ e $Z_{linha2} (\Omega / milha) = 1,2936 + j0,6913$.

5.2. Simulações

5.2.1. Caso 1

Características:

- $U_n = 30 \text{ kV}$;
- $S_{CC_{MT1}} = 500 \text{ MVA}$;
- $Z_{linha1} (\Omega / milha) = 0,2926 + j0,1973$.

Em primeiro lugar foi calculada a impedância de curto-circuito, Z_{cc} , a montante do barramento de Média Tensão. Utilizando as fórmulas (8) a (11) temos que:

$$\begin{aligned} |Z_{cc}'| &= 1,8 \Omega \\ Z_{cc} &= 0,18 + j1,791 (\Omega) \end{aligned} \quad (13)$$

De seguida, foi necessário converter as unidades de Z_{linha1} . Aplicando o fator de multiplicação referido anteriormente, temos que:

$$Z_{linha1} (\Omega / km); 0,1818 + j0,1226 \quad (14)$$

Tendo conhecimento das impedâncias necessárias, foi calculada em Excel e com as expressões (4) a (7), a impedância equivalente para 120 pontos diferentes, separados de 0,1 km entre si, ao longo de 12 km da linha de Média Tensão.

Do mesmo modo, e segundo as expressões (3) e (12), foram calculadas as correntes de curto-circuito, assim as tensões residuais, em cada um desses pontos (ver resultados no Anexo A).

Após a verificação de todos os resultados, foi construído o gráfico que relaciona a tensão residual no barramento (U_r (%)), em percentagem, com a distância ao defeito. O gráfico pode ser visto na Figura 24.

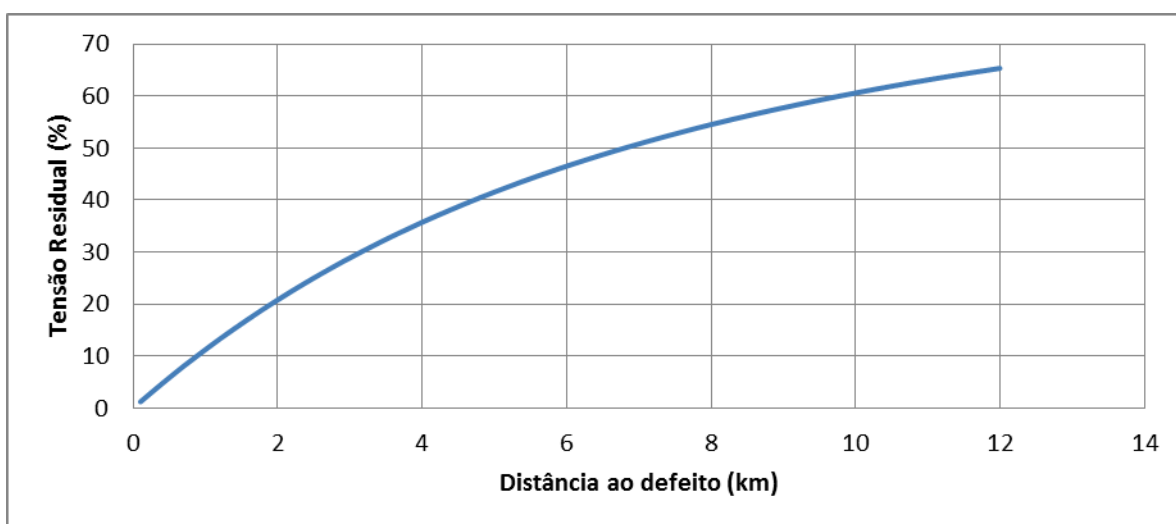


Figura 24: Relação tensão residual / distância ao defeito do Caso 1

Após análise dos resultados e visualização do gráfico, e tendo em conta a tabela de classificação de cavas de tensão da norma EN 50160:2010 e curva de partilha de responsabilidade do em vigor no regulamento Sueco, pode-se concluir que, nos cinco primeiros 5 quilómetros da linha de Média Tensão a tensão residual no barramento apresenta valores ainda abaixo dos 40%. De modo a evitar estas cavas críticas esta zona da linha terá que ter uma manutenção mais cuidada do que no que resta da linha. Mais à frente, neste documento, iremos comparar este caso com os restantes.

5.2.2. Caso 2

Características:

- $U_n = 30\text{ kV}$;
- $S_{CC_{MR1}} = 500\text{ MVA}$;
- $Z_{linha2}(\Omega / milha) = 1,2936 + j0,6913$.

Utilizando a mesma metodologia do Caso 1, os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 25. Assim como no caso anterior, todos os resultados podem ser consultados no Anexo A.

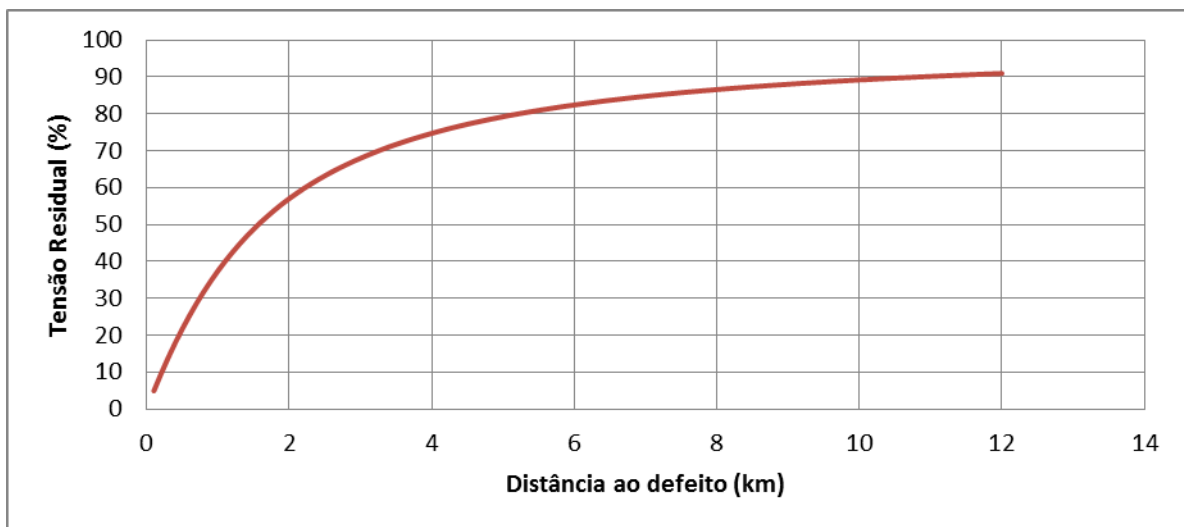


Figura 25: Relação tensão residual / distância ao defeito do Caso 2

Utilizando a mesma avaliação que no caso anterior, a manutenção desta linha deveria ser mais incisiva no primeiro quilômetro da linha. Para uma maior fiabilidade até se poderia alargar esta manutenção até aos 3 quilómetros, onde a tensão residual se encontra perto dos 70%.

5.2.3. Caso 3

Características:

- $U_n = 30\text{ kV}$;
- $S_{CC_{MR2}} = 700\text{ MVA}$;
- $Z_{linha1}(\Omega / milha) = 0,2926 + j0,1973$.

Utilizando a mesma metodologia dos casos anteriores, os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 26. Todos resultados podem ser consultados no Anexo A.

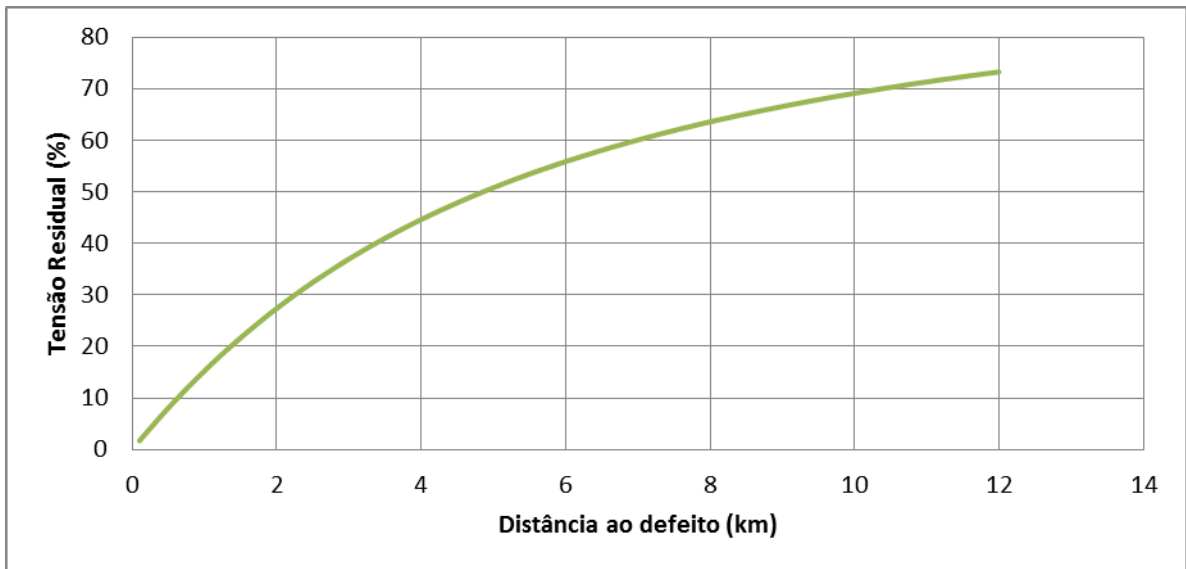


Figura 26: Relação tensão residual / distância ao defeito do Caso 3

Neste caso a manutenção mais incisiva deverá ser assegurada sensivelmente nos 3 primeiros quilômetros da linha de Média Tensão.

5.2.4. Caso 4

Características:

- $U_n = 30 \text{ kV}$;
- $S_{CC_{MT2}} = 700 \text{ MVA}$;
- $Z_{linha2} (\Omega / milha) = 1,2936 + j0,6913$.

Utilizando a mesma metodologia dos casos anteriores, os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 27. Todos os resultados podem ser consultados no Anexo A.

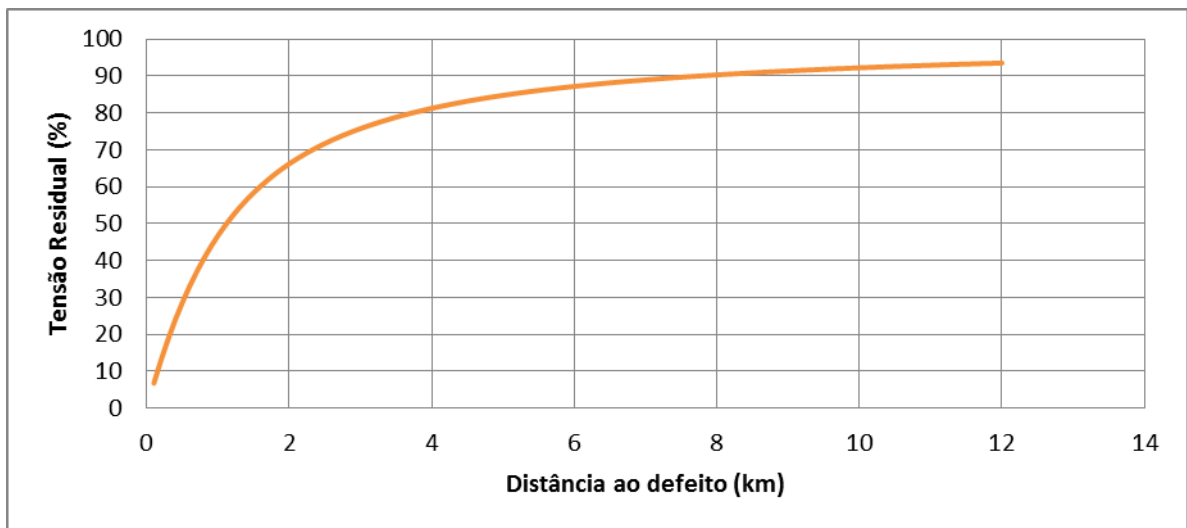


Figura 27: Relação tensão residual / distância ao defeito do Caso 4

Neste caso a manutenção mais incisiva deverá ser assegurada sensivelmente no primeiro quilómetro da linha de Média Tensão.

5.3. Conclusões

De modo a uma melhor percepção dos resultados obtidos nos casos simulados, é apresentado agora um gráfico, onde se pode visualizar a agregação dos quatro resultados. Ver Figura 28.

Na tabela 7 são lembradas as principais características dos casos simulados.

Tabela 7: Resumo das principais características dos 4 casos simulados

	Impedância (Ω /km)	Potência de curto-circuito (MVA)
Caso 1	0,1818 + j0,1226	500
Caso 2	0,8038 + j0,4171	500
Caso 3	0,1818 + j0,1226	700
Caso 4	0,8038 + j0,4171	700

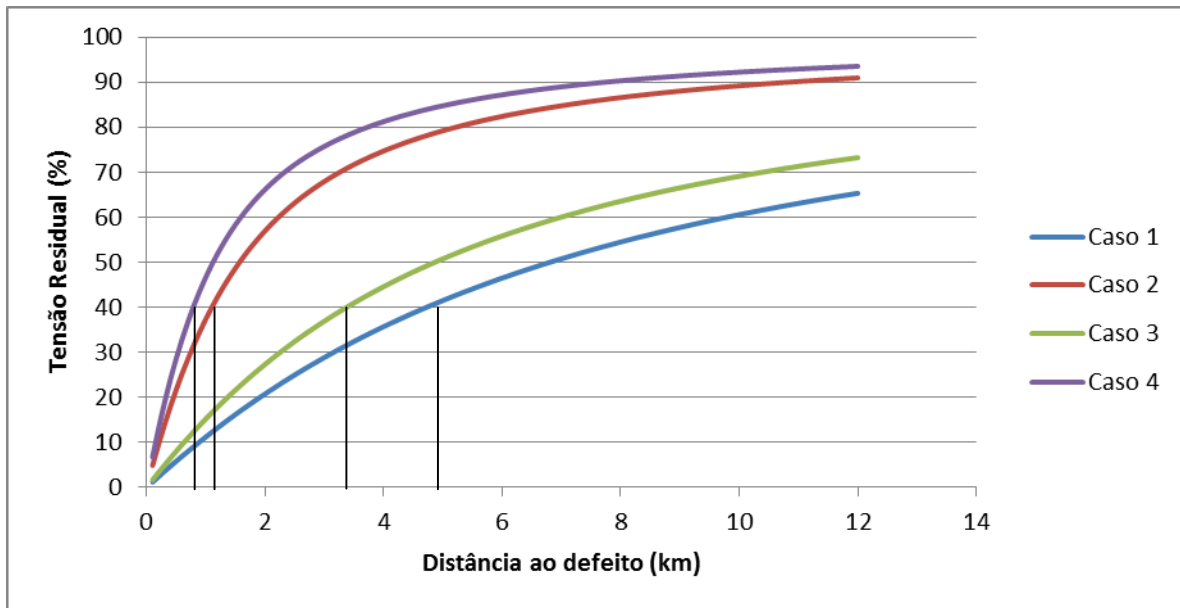


Figura 28: Relação tensão residual / distância ao defeito de todos os casos simulados

A partir da visualização da Figura 28 pode-se concluir que quanto maior for a impedância da linha por quilómetro ($Z_{linha} (\Omega/km)$), menor será a distância a partir do barramento em que os cuidados com a manutenção da linha terão de ser mais elevados, de modo a evitar cavas mais problemáticas.

Pode-se ainda concluir que uma maior potência de curto-circuito no barramento de Média Tensão ($S_{CC_{MT}}$) permite também reduzir a distância em que a manutenção da linha terá de ser mais elevada.

Este método permite também, como era pretendido inicialmente, fazer uma estimativa da localização de um defeito. Por exemplo, para o Caso 1, se a tensão residual no barramento de Média Tensão for cerca de 50 % da tensão nominal, o defeito estará a mais ou menos 7 quilómetros de distância.

6. Conclusões

6.1. Conclusão

Esta dissertação possibilitou-me aprofundar alguns dos conhecimentos adquiridos ao longo do meu percurso académico, nomeadamente conceitos, qualidade de energia e cavas de tensão.

Atendendo ao aumento da exigência do utilizador final de energia relativamente à qualidade de energia eléctrica, face à elevada sensibilidade dos processos de produção a perturbações de tensão de reduzida severidade, com especial destaque para as cavas de tensão, é fundamental assegurar a continuidade de serviço.

A abordagem feita ao conceito de curva de responsabilidade mostra que, esta curva é uma fronteira hipotética para discriminar responsabilidades entre as Operadoras de Energia, os fabricantes de equipamentos e os utilizadores finais de energia. As cavas de tensão situadas acima desta curva representam o comportamento permitido à rede e, como tal, os utilizadores finais devem começar a ter a preocupação de garantir um patamar mínimo de imunidade dos seus equipamentos uma vez que, no panorama europeu, estas curvas já são aplicadas.

A análise feita aos dados de monitorização das cavas de tensão mostra que a maior parte dos eventos ocorridos enquadraram-se na Área B da curva de partilha de responsabilidade.

O trabalho desenvolvido nesta dissertação apresentou uma metodologia proposta para localização de defeitos em redes de Média Tensão, o que permite também ter uma estimativa da distância ao barramento em que a rede deve ter uma manutenção mais exaustiva. Permite também perceber a partir de que ponto, um defeito que ocorra na linha deixa de ser crítico para a estabilidade do sistema de energia.

Esta dissertação tem como objectivo contribuir para o desenvolvimento deste tipo de metodologias através da consideração das impedâncias das linhas de Média Tensão.

6.2. Trabalhos Futuros

Futuramente seria interessante desenvolver o método apresentado nesta dissertação de modo a que seja possível calcular com a maior exactidão possível qual a localização de um defeito que ocorra numa linha. A criação de um *software* específico para este método seria sem dúvida uma mais-valia.

Bibliografia

- [1] *Regulamento da Qualidade de Serviço*, Despacho n.º 5255/2006 (2.a série), Diário da República - II série, 8 de Março 2006
- [2] Georgilakis P., Prévé C., Chollot Y., Bidaut M., Deschamps P., Londos N., *Managing MV Networks for Quality of Service*, IEEE Computer Applications in Power, ISSN: 0895-0156, pp. 44-49, July 2002
- [3] K. Zimmerman, D. David Costello, *Impedance-Based Fault Location Experience*, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.
- [4] Mokhtar A., *Distribution Network Fault Section Estimation Using Analytical Database Approach*, School of Electrical & Electronic Engineering, The University of Manchester, Faculty of Engineering and Physical Science, November 2004
- [5] Malaman R., Afonso J., Schiavo L., Romero A., Iveda C., Volijk R., Wharmby B., *Quality of Electricity Supply: Initial Benchmarking on Actual Levels, Standards and Regulatory Strategies*, prepared by the Working Group on Quality of Electricity Supply, Council of European Energy Regulators, April 2001
- [6] *5th CEER Benchmarking Report on the Quality of Electricity Supply*, CEER, 2011
- [7] Bollen M. H. J., *Understanding Power Quality Problems – Voltage Sags and Interruptions*, IEEE Press series on power engineering – Wiley-Interscience, 2000
- [8] *Manual de Qualidade da Energia Eléctrica*, EDP Distribuição-Energia, Dezembro 2005
- [9] *EN 50160 - Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks*, Julho 2010.
- [10] Dugan, Roger C., *Electrical Power Systems Quality*. McGraw-Hill, 2004.

- [11] Nuno Melo, *Qualidade de Energia Eléctrica: Acção do Operador da Rede de Distribuição*, EDP Distribuição
- [12] Pedro Rocha, Fernando Pimenta, *Perturbações em sistemas de energia*, QEnergia.
- [13] CIGRE/CIREN/UIE, *Voltage Dip Immunity of Equipment and Installations*, Abril 2010.
- [14] Park , C.H. and Jang, G., "Fast method to determine an area of vulnerability for stochastic prediction", IEEE
of voltage sags." Coréia do Sul : Novembro 2005, Vols. 152, pag 819-820.
- [15] Goswami, A.K., Gupta, C.P. and Singh, G. K., "Area of Vulnerability for Prediction of Voltage Sags by an Analytical Method in Indian Distribution systems." India : 2008.
- [16] ERGEG, Towards Voltage Quality Regulation In Europe: An ERGEG Public Consultation Paper. Belgica : 2006.
- [17] ERGEG, ERCEG Public Consultation Towards Voltage Quality in Europe: An ERGEG Public Consultation Paper. Belgica : 2007.
- [18] *3rd CEER Benchmarking Report on the Quality of Electricity Supply*, CEER, 2005
- [19] L. Ström, M. Bollen, R. Kolessar, Voltage quality regulation in Sweden, Int. Conf. Electricity Distribution (CIRED), Frankfurt, June 2011.
- [20] J. Esteves, K. Brekke, K. Niall, M. Delfanti, M. Bollen, *Voltage quality monitoring, dips qualification and responsibility sharing*, IEEE, 2011
- [21] Hardi, Surya and Daut, I., "Sensitivity of Low Voltage Consumer Equipment to Voltage Sags." Malasia : junho 2010. The 4 th International Power Engineering and Optimization Conf. (PEOCO 2010)
- [22] Prof. Humberto Jorge, *Slides da unidade curricular: Técnicas de Alta Tensão e Protecções*
- [23] Stephens, Mark and EPRI., *Power Quality and Utilisation Guide, PQ In Continuous Manufacturing*. s.: Leonard Power Quality Initiative, 2006.
- [24] B. Metz-Noblat, F. Dumas, G. Thomasset, *Calculation of short-circuit currents*, Cahier technique no. 158, Schneider Electric

Anexos

A. Dados e Resultados das Simulações Realizadas

Caso 1

Tabela 8: Dados da linha MT do Caso 1

Imp. Linha(Ω /ml) $Z=R+jX$		Imp. Linha(Ω /km) $Z=R+jX$	
R	X	R	X
0,2926	0,1973	0,181813	0,122596301

Zcc rede montante	Zcc=1,8
Rcc=0,18	Xcc=1,791

Scc (MVA)	Un (kV)
500	30

Ω /ml \rightarrow Ω /km
0,62137

Tabela 9: Resultados dos cálculos realizados para o Caso 1

Distância (km)	R (Ω /km)	X (Ω /km)	Zcc (Ω)	Icc (A)	Ur (V)	Ur (%)
0,1	0,018181286	0,01225963	1,814117	9547,624	362,6304	1,208768
0,2	0,036362572	0,02451926	1,828366	9473,216	719,6086	2,398695
0,3	0,054543859	0,03677889	1,842766	9399,19	1070,978	3,569927
0,4	0,072725145	0,04903852	1,857313	9325,573	1416,787	4,722622
0,5	0,090906431	0,061298151	1,872004	9252,389	1757,085	5,85695
0,6	0,109087717	0,073557781	1,886835	9179,661	2091,928	6,973094
0,7	0,127269003	0,085817411	1,901804	9107,41	2421,374	8,071246
0,8	0,14545029	0,098077041	1,916906	9035,657	2745,482	9,151607
0,9	0,163631576	0,110336671	1,93214	8964,418	3064,316	10,21439
1	0,181812862	0,122596301	1,947501	8893,71	3377,94	11,2598
1,1	0,199994148	0,134855931	1,962987	8823,549	3686,421	12,28807
1,2	0,218175434	0,147115561	1,978594	8753,946	3989,827	13,29942
1,3	0,236356721	0,159375191	1,994321	8684,915	4288,228	14,29409
1,4	0,254538007	0,171634821	2,010164	8616,466	4581,694	15,27231
1,5	0,272719293	0,183894452	2,02612	8548,609	4870,299	16,23433
1,6	0,290900579	0,196154082	2,042187	8481,352	5154,113	17,18038
1,7	0,309081865	0,208413712	2,058363	8414,702	5433,211	18,1107
1,8	0,327263152	0,220673342	2,074643	8348,667	5707,666	19,02555
1,9	0,345444438	0,232932972	2,091028	8283,252	5977,552	19,92517
2	0,363625724	0,245192602	2,107513	8218,46	6242,943	20,80981
2,1	0,38180701	0,257452232	2,124096	8154,296	6503,913	21,67971
2,2	0,399988296	0,269711862	2,140776	8090,763	6760,535	22,53512
2,3	0,418169583	0,281971492	2,157549	8027,863	7012,885	23,37628
2,4	0,436350869	0,294231122	2,174414	7965,597	7261,035	24,20345
2,5	0,454532155	0,306490753	2,191369	7903,967	7505,057	25,01686
2,6	0,472713441	0,318750383	2,208412	7842,971	7745,026	25,81675
2,7	0,490894727	0,331010013	2,22554	7782,611	7981,013	26,60338
2,8	0,509076014	0,343269643	2,242751	7722,885	8213,088	27,37696
2,9	0,5272573	0,355529273	2,260044	7663,791	8441,324	28,13775
3	0,545438586	0,367788903	2,277418	7605,328	8665,789	28,88596
3,1	0,563619872	0,380048533	2,294869	7547,494	8886,554	29,62185

Distância (km)	R (Ω /km)	X (Ω /km)	Zcc (Ω)	Icc (A)	Ur (V)	Ur (%)
3,2	0,581801158	0,392308163	2,312396	7490,286	9103,687	30,34562
3,3	0,599982445	0,404567793	2,329998	7433,701	9317,254	31,05751
3,4	0,618163731	0,416827423	2,347673	7377,735	9527,323	31,75774
3,5	0,636345017	0,429087054	2,365419	7322,386	9733,96	32,44653
3,6	0,654526303	0,441346684	2,383234	7267,648	9937,229	33,1241
3,7	0,672707589	0,453606314	2,401118	7213,518	10137,19	33,79065
3,8	0,690888876	0,465865944	2,419068	7159,991	10333,92	34,44639
3,9	0,709070162	0,478125574	2,437084	7107,063	10527,46	35,09154
4	0,727251448	0,490385204	2,455163	7054,729	10717,89	35,7263
4,1	0,745432734	0,502644834	2,473304	7002,984	10905,26	36,35086
4,2	0,76361402	0,514904464	2,491506	6951,822	11089,63	36,96542
4,3	0,781795307	0,527164094	2,509768	6901,239	11271,05	37,57017
4,4	0,799976593	0,539423724	2,528088	6851,228	11449,59	38,16531
4,5	0,818157879	0,551683355	2,546465	6801,785	11625,3	38,75101
4,6	0,836339165	0,563942985	2,564898	6752,903	11798,24	39,32747
4,7	0,854520451	0,576202615	2,583386	6704,577	11968,46	39,89486
4,8	0,872701738	0,588462245	2,601927	6656,801	12136,01	40,45335
4,9	0,890883024	0,600721875	2,62052	6609,57	12300,94	41,00312
5	0,90906431	0,612981505	2,639164	6562,876	12463,3	41,54434
5,1	0,927245596	0,625241135	2,657859	6516,715	12623,15	42,07717
5,2	0,945426882	0,637500765	2,676603	6471,079	12780,53	42,60178
5,3	0,963608169	0,649760395	2,695394	6425,964	12935,5	43,11832
5,4	0,981789455	0,662020025	2,714233	6381,363	13088,09	43,62695
5,5	0,999970741	0,674279656	2,733118	6337,27	13238,35	44,12783
5,6	1,018152027	0,686539286	2,752048	6293,679	13386,33	44,6211
5,7	1,036333313	0,698798916	2,771022	6250,584	13532,07	45,10691
5,8	1,0545146	0,711058546	2,79004	6207,978	13675,62	45,58541
5,9	1,072695886	0,723318176	2,8091	6165,857	13817,02	46,05673
6	1,090877172	0,735577806	2,828202	6124,213	13956,3	46,52101
6,1	1,109058458	0,747837436	2,847344	6083,04	14093,52	46,9784
6,2	1,127239744	0,760097066	2,866526	6042,334	14228,7	47,42901
6,3	1,145421031	0,772356696	2,885747	6002,087	14361,9	47,87299
6,4	1,163602317	0,784616326	2,905007	5962,294	14493,13	48,31045
6,5	1,181783603	0,796875957	2,924304	5922,95	14622,46	48,74152
6,6	1,199964889	0,809135587	2,943639	5884,047	14749,9	49,16632
6,7	1,218146175	0,821395217	2,963009	5845,581	14875,49	49,58498
6,8	1,236327462	0,833654847	2,982415	5807,545	14999,28	49,9976
6,9	1,254508748	0,845914477	3,001855	5769,935	15121,29	50,40431
7	1,272690034	0,858174107	3,021329	5732,744	15241,56	50,80521
7,1	1,29087132	0,870433737	3,040837	5695,967	15360,12	51,20041
7,2	1,309052606	0,882693367	3,060378	5659,598	15477,01	51,59002
7,3	1,327233893	0,894952997	3,079951	5623,631	15592,24	51,97415
7,4	1,345415179	0,907212627	3,099555	5588,062	15705,87	52,35289
7,5	1,363596465	0,919472258	3,119191	5552,885	15817,9	52,72634
7,6	1,381777751	0,931731888	3,138856	5518,095	15928,38	53,09461
7,7	1,399959037	0,943991518	3,158552	5483,687	16037,34	53,45779
7,8	1,418140324	0,956251148	3,178276	5449,654	16144,79	53,81598
7,9	1,43632161	0,968510778	3,19803	5415,993	16250,78	54,16925
8	1,454502896	0,980770408	3,217812	5382,698	16355,32	54,51772
8,1	1,472684182	0,993030038	3,237621	5349,764	16458,44	54,86146
8,2	1,490865468	1,005289668	3,257457	5317,187	16560,17	55,20055
8,3	1,509046755	1,017549298	3,27732	5284,96	16660,53	55,53509
8,4	1,527228041	1,029808928	3,29721	5253,081	16759,55	55,86516
8,5	1,545409327	1,042068559	3,317124	5221,543	16857,25	56,19083
8,6	1,563590613	1,054328189	3,337065	5190,342	16953,66	56,51219
8,7	1,581771899	1,066587819	3,35703	5159,474	17048,79	56,82931
8,8	1,599953186	1,078847449	3,377019	5128,934	17142,68	57,14226
8,9	1,618134472	1,091107079	3,397032	5098,717	17235,34	57,45113
9	1,636315758	1,103366709	3,417069	5068,82	17326,8	57,75599
9,1	1,654497044	1,115626339	3,437129	5039,237	17417,07	58,0569

Distância (km)	R (Ω/km)	X (Ω/km)	Zcc (Ω)	Icc (A)	Ur (V)	Ur (%)
9,2	1,67267833	1,127885969	3,457212	5009,965	17506,18	58,35394
9,3	1,690859617	1,140145599	3,477317	4980,998	17594,15	58,64716
9,4	1,709040903	1,152405229	3,497443	4952,334	17681	58,93665
9,5	1,727222189	1,16466486	3,517592	4923,968	17766,74	59,22246
9,6	1,745403475	1,17692449	3,537761	4895,895	17851,4	59,50466
9,7	1,763584761	1,18918412	3,557952	4868,112	17934,99	59,78331
9,8	1,781766048	1,20144375	3,578162	4840,616	18017,54	60,05848
9,9	1,799947334	1,21370338	3,598393	4813,401	18099,06	60,33021
10	1,81812862	1,22596301	3,618644	4786,464	18179,57	60,59858
10,1	1,836309906	1,23822264	3,638914	4759,801	18259,09	60,86363
10,2	1,854491192	1,25048227	3,659203	4733,41	18337,63	61,12543
10,3	1,872672479	1,2627419	3,679511	4707,285	18415,21	61,38403
10,4	1,890853765	1,27500153	3,699838	4681,423	18491,84	61,63947
10,5	1,909035051	1,28726116	3,720183	4655,822	18567,55	61,89183
10,6	1,927216337	1,299520791	3,740545	4630,477	18642,34	62,14114
10,7	1,945397623	1,311780421	3,760926	4605,384	18716,24	62,38746
10,8	1,96357891	1,324040051	3,781323	4580,542	18789,25	62,63084
10,9	1,981760196	1,336299681	3,801738	4555,945	18861,4	62,87133
11	1,999941482	1,348559311	3,822169	4531,591	18932,69	63,10897
11,1	2,018122768	1,360818941	3,842617	4507,477	19003,14	63,34381
11,2	2,036304054	1,373078571	3,863081	4483,599	19072,77	63,57589
11,3	2,054485341	1,385338201	3,883561	4459,955	19141,58	63,80527
11,4	2,072666627	1,397597831	3,904057	4436,54	19209,6	64,03198
11,5	2,090847913	1,409857461	3,924569	4413,353	19276,82	64,25608
11,6	2,109029199	1,422117092	3,945095	4390,39	19343,28	64,47759
11,7	2,127210485	1,434376722	3,965637	4367,649	19408,97	64,69656
11,8	2,145391772	1,446636352	3,986193	4345,125	19473,91	64,91304
11,9	2,163573058	1,458895982	4,006764	4322,817	19538,12	65,12706
12	2,181754344	1,471155612	4,027349	4300,722	19601,6	65,33866

Caso 2

Tabela 10: Dados da linha MT do Caso 2

Imp. Linha(Ω/ml) Z=R+jX		Imp. Linha(Ω/km) Z=R+jX	
R	X	R	X
1,2936	0,6713	0,803804	0,417125681

Z rede montante	Zcc'=1,8
Rcc=0,18	Xcc=1,791

Scc (MVA)	Un (kV)
500	30

Ω/ml -> Ω /km
0,62137

Tabela 11: Resultados dos cálculos realizados para o Caso 2

Distância (km)	R (Ω/km)	X (Ω/km)	Zcc (Ω)	Icc (A)	Ur (V)	Ur (%)
0,1	0,080380423	0,041712568	1,851117	9356,788	1467,64	4,892133
0,2	0,160760846	0,083425136	1,905148	9091,426	2852,034	9,50678
0,3	0,24114127	0,125137704	1,961872	8828,56	4154,357	13,84786

Distância (km)	R (Ω /km)	X (Ω /km)	Zcc (Ω)	Icc (A)	Ur (V)	Ur (%)
0,4	0,321521693	0,166850272	2,021064	8569,993	5376,915	17,92305
0,5	0,401902116	0,208562841	2,082513	8317,118	6522,823	21,74274
0,6	0,482282539	0,250275409	2,146025	8070,972	7595,735	25,31912
0,7	0,562662962	0,291987977	2,211422	7832,294	8599,63	28,66543
0,8	0,643043386	0,333700545	2,278542	7601,576	9538,637	31,79546
0,9	0,723423809	0,375413113	2,347237	7379,106	10416,91	34,72304
1	0,803804232	0,417125681	2,417372	7165,014	11238,54	37,46179
1,1	0,884184655	0,458838249	2,488827	6959,305	12007,46	40,02488
1,2	0,964565078	0,500550817	2,561491	6761,886	12727,46	42,42488
1,3	1,044945502	0,542263385	2,635263	6572,593	13402,1	44,67366
1,4	1,125325925	0,583975953	2,710053	6391,207	14034,72	46,78239
1,5	1,205706348	0,625688522	2,785779	6217,474	14628,44	48,76146
1,6	1,286086771	0,66740109	2,862367	6051,113	15186,16	50,62053
1,7	1,366467194	0,709113658	2,93975	5891,831	15710,57	52,36856
1,8	1,446847618	0,750826226	3,017866	5739,324	16204,14	54,01379
1,9	1,527228041	0,792538794	3,09666	5593,288	16669,15	55,56384
2	1,607608464	0,834251362	3,176081	5453,422	17107,71	57,02569
2,1	1,687988887	0,87596393	3,256083	5319,43	17521,74	58,40579
2,2	1,76836931	0,917676498	3,336626	5191,025	17913,01	59,71003
2,3	1,848749734	0,959389066	3,41767	5067,929	18283,15	60,94385
2,4	1,929130157	1,001101634	3,49918	4949,876	18633,67	62,11222
2,5	2,00951058	1,042814203	3,581125	4836,61	18965,92	63,21972
2,6	2,089891003	1,084526771	3,663476	4727,889	19281,17	64,27056
2,7	2,170271426	1,126239339	3,746206	4623,48	19580,57	65,26858
2,8	2,25065185	1,167951907	3,82929	4523,164	19865,21	66,21736
2,9	2,331032273	1,209664475	3,912706	4426,734	20136,04	67,12014
3	2,411412696	1,251377043	3,996433	4333,992	20393,98	67,97994
3,1	2,491793119	1,293089611	4,080452	4244,752	20639,86	68,79954
3,2	2,572173542	1,334802179	4,164745	4158,84	20874,45	69,58149
3,3	2,652553966	1,376514747	4,249295	4076,089	21098,44	70,32814
3,4	2,732934389	1,418227315	4,334089	3996,344	21312,5	71,04168
3,5	2,813314812	1,459939884	4,419111	3919,455	21517,24	71,72412
3,6	2,893695235	1,501652452	4,504349	3845,285	21713,2	72,37733
3,7	2,974075658	1,54336502	4,589791	3773,703	21900,91	73,00303
3,8	3,054456082	1,585077588	4,675426	3704,584	22080,85	73,60283
3,9	3,134836505	1,626790156	4,761243	3637,813	22253,47	74,17822
4	3,215216928	1,668502724	4,847232	3573,278	22419,17	74,73057
4,1	3,295597351	1,710215292	4,933385	3510,877	22578,35	75,26117
4,2	3,375977774	1,75192786	5,019693	3450,512	22731,36	75,77122
4,3	3,456358198	1,793640428	5,106148	3392,089	22878,55	76,26182
4,4	3,536738621	1,835352996	5,192743	3335,522	23020,21	76,73402
4,5	3,617119044	1,877065565	5,279471	3280,728	23156,63	77,18878
4,6	3,697499467	1,918778133	5,366326	3227,629	23288,1	77,62701
4,7	3,77787989	1,960490701	5,453301	3176,151	23414,87	78,04956
4,8	3,858260314	2,002203269	5,540391	3126,225	23537,16	78,45722
4,9	3,938640737	2,043915837	5,627591	3077,784	23655,22	78,85072
5	4,01902116	2,085628405	5,714895	3030,766	23769,23	79,23076
5,1	4,099401583	2,127340973	5,802299	2985,111	23879,4	79,598
5,2	4,179782006	2,169053541	5,889798	2940,764	23985,91	79,95305
5,3	4,26016243	2,210766109	5,977389	2897,671	24088,94	80,29648
5,4	4,340542853	2,252478677	6,065066	2855,782	24188,65	80,62882
5,5	4,420923276	2,294191246	6,152827	2815,049	24285,18	80,9506
5,6	4,501303699	2,335903814	6,240668	2775,425	24378,69	81,26229
5,7	4,581684122	2,377616382	6,328586	2736,869	24469,3	81,56433
5,8	4,662064546	2,41932895	6,416577	2699,338	24557,15	81,85716
5,9	4,742444969	2,461041518	6,504638	2662,793	24642,35	82,14118
6	4,822825392	2,502754086	6,592768	2627,198	24725,03	82,41677
6,1	4,903205815	2,544466654	6,680962	2592,517	24805,28	82,68428
6,2	4,983586238	2,586179222	6,769219	2558,716	24883,22	82,94405
6,3	5,063966662	2,62789179	6,857535	2525,763	24958,92	83,19641

Distância (km)	R (Ω)	X (Ω)	Zcc (Ω)	Icc (A)	Ur (V)	Ur (%)
6,4	5,144347085	2,669604358	6,94591	2493,627	25032,5	83,44166
6,5	5,224727508	2,711316927	7,03434	2462,279	25104,03	83,68008
6,6	5,305107931	2,753029495	7,122823	2431,691	25173,59	83,91196
6,7	5,385488354	2,794742063	7,211358	2401,837	25241,26	84,13754
6,8	5,465868778	2,836454631	7,299943	2372,691	25307,12	84,35708
6,9	5,546249201	2,878167199	7,388576	2344,228	25371,24	84,5708
7	5,626629624	2,919879767	7,477255	2316,426	25433,68	84,77894
7,1	5,707010047	2,961592335	7,565978	2289,262	25494,51	84,98169
7,2	5,78739047	3,003304903	7,654744	2262,715	25553,78	85,17927
7,3	5,867770894	3,045017471	7,743552	2236,765	25611,56	85,37186
7,4	5,948151317	3,086730039	7,8324	2211,392	25667,89	85,55964
7,5	6,02853174	3,128442608	7,921287	2186,578	25722,84	85,7428
7,6	6,108912163	3,170155176	8,010211	2162,304	25776,44	85,92148
7,7	6,189292586	3,211867744	8,099171	2138,553	25828,76	86,09586
7,8	6,26967301	3,253580312	8,188167	2115,31	25879,82	86,26607
7,9	6,350053433	3,29529288	8,277196	2092,557	25929,68	86,43228
8	6,430433856	3,337005448	8,366258	2070,281	25978,38	86,5946
8,1	6,510814279	3,378718016	8,455352	2048,467	26025,96	86,75318
8,2	6,591194702	3,420430584	8,544477	2027,1	26072,44	86,90814
8,3	6,671575126	3,462143152	8,633632	2006,167	26117,88	87,0596
8,4	6,751955549	3,50385572	8,722815	1985,656	26162,3	87,20768
8,5	6,832335972	3,545568289	8,812027	1965,553	26205,74	87,35248
8,6	6,912716395	3,587280857	8,901266	1945,848	26248,23	87,4941
8,7	6,993096818	3,628993425	8,990531	1926,528	26289,8	87,63266
8,8	7,073477242	3,670705993	9,079822	1907,582	26330,48	87,76825
8,9	7,153857665	3,712418561	9,169138	1889,001	26370,29	87,90096
9	7,234238088	3,754131129	9,258478	1870,773	26409,26	88,03088
9,1	7,314618511	3,795843697	9,347841	1852,889	26447,43	88,15809
9,2	7,394998934	3,837556265	9,437227	1835,339	26484,81	88,28268
9,3	7,475379358	3,879268833	9,526635	1818,114	26521,42	88,40473
9,4	7,555759781	3,920981401	9,616065	1801,205	26557,29	88,52431
9,5	7,636140204	3,96269397	9,705516	1784,605	26592,45	88,6415
9,6	7,716520627	4,004406538	9,794987	1768,303	26626,91	88,75636
9,7	7,79690105	4,046119106	9,884478	1752,294	26660,69	88,86896
9,8	7,877281474	4,087831674	9,973988	1736,568	26693,81	88,97937
9,9	7,957661897	4,129544242	10,06352	1721,119	26726,29	89,08765
10	8,03804232	4,17125681	10,15306	1705,939	26758,16	89,19386
10,1	8,118422743	4,212969378	10,24263	1691,022	26789,42	89,29805
10,2	8,198803166	4,254681946	10,33221	1676,36	26820,09	89,40029
10,3	8,27918359	4,296394514	10,42181	1661,948	26850,19	89,50063
10,4	8,359564013	4,338107082	10,51143	1647,779	26879,74	89,59912
10,5	8,439944436	4,37981965	10,60106	1633,847	26908,74	89,69581
10,6	8,520324859	4,421532219	10,69071	1620,146	26937,22	89,79074
10,7	8,600705282	4,463244787	10,78037	1606,671	26965,19	89,88397
10,8	8,681085706	4,504957355	10,87005	1593,416	26992,66	89,97554
10,9	8,761466129	4,546669923	10,95974	1580,376	27019,65	90,06549
11	8,841846552	4,588382491	11,04945	1567,546	27046,16	90,15386
11,1	8,922226975	4,630095059	11,13917	1554,92	27072,21	90,2407
11,2	9,002607398	4,671807627	11,2289	1542,494	27097,81	90,32604
11,3	9,082987822	4,713520195	11,31865	1530,263	27122,98	90,40992
11,4	9,163368245	4,755232763	11,4084	1518,224	27147,72	90,49239
11,5	9,243748668	4,796945331	11,49818	1506,37	27172,04	90,57346
11,6	9,324129091	4,8386579	11,58796	1494,699	27195,96	90,65319
11,7	9,404509514	4,880370468	11,67776	1483,205	27219,48	90,73159
11,8	9,484889938	4,922083036	11,76756	1471,886	27242,61	90,80871
11,9	9,565270361	4,963795604	11,85738	1460,736	27265,37	90,88457
12	9,645650784	5,005508172	11,94721	1449,753	27287,76	90,95921

Caso 3

Tabela 12: Dados da linha MT do Caso 3

Imp. Linha(Ω/ml) $Z=R+jX$		Imp. Linha(Ω/km) $Z=R+jX$	
R	X	R	X
0,2926	0,1973	0,181813	0,122596301

Zcc rede montante	Zcc'=1,8
Rcc=0,18	Xcc=1,791

Scc (MVA)	Un (kV)
700	30

$\Omega/ml \rightarrow \Omega/km$
0,62137

Tabela 13: Resultados dos cálculos realizados para o Caso 3

Distância (km)	R (Ω/km)	X (Ω/km)	Zcc (Ω)	Icc (A)	Ur (V)	Ur (%)
0,1	0,018181286	0,01225963	1,299856	13324,94	506,0976	1,686992
0,2	0,036362572	0,02451926	1,314196	13179,55	1001,151	3,337169
0,3	0,054543859	0,03677889	1,328743	13035,26	1485,285	4,950951
0,4	0,072725145	0,04903852	1,34349	12892,17	1958,642	6,528807
0,5	0,090906431	0,061298151	1,358431	12750,37	2421,374	8,071246
0,6	0,109087717	0,073557781	1,37356	12609,94	2873,645	9,578817
0,7	0,127269003	0,085817411	1,38887	12470,93	3315,629	11,0521
0,8	0,14545029	0,098077041	1,404356	12333,42	3747,506	12,49169
0,9	0,163631576	0,110336671	1,420012	12197,44	4169,463	13,89821
1	0,181812862	0,122596301	1,435831	12063,05	4581,694	15,27231
1,1	0,199994148	0,134855931	1,45181	11930,29	4984,395	16,61465
1,2	0,218175434	0,147115561	1,467942	11799,18	5377,766	17,92589
1,3	0,236356721	0,159375191	1,484223	11669,75	5762,007	19,20669
1,4	0,254538007	0,171634821	1,500648	11542,02	6137,321	20,45774
1,5	0,272719293	0,183894452	1,517211	11416,01	6503,913	21,67971
1,6	0,290900579	0,196154082	1,53391	11291,74	6861,984	22,87328
1,7	0,309081865	0,208413712	1,550739	11169,2	7211,737	24,03912
1,8	0,327263152	0,220673342	1,567693	11048,4	7553,373	25,17791
1,9	0,345444438	0,232932972	1,58477	10929,35	7887,091	26,2903
2	0,363625724	0,245192602	1,601965	10812,04	8213,088	27,37696
2,1	0,38180701	0,257452232	1,619274	10696,46	8531,559	28,43853
2,2	0,399988296	0,269711862	1,636694	10582,62	8842,694	29,47565
2,3	0,418169583	0,281971492	1,654222	10470,49	9146,683	30,48894
2,4	0,436350869	0,294231122	1,671853	10360,07	9443,711	31,47904
2,5	0,454532155	0,306490753	1,689585	10251,34	9733,96	32,44653
2,6	0,472713441	0,318750383	1,707414	10144,29	10017,61	33,39203
2,7	0,490894727	0,331010013	1,725338	10038,91	10294,83	34,3161
2,8	0,509076014	0,343269643	1,743353	9935,169	10565,8	35,21932
2,9	0,5272573	0,355529273	1,761457	9833,057	10830,67	36,10224
3	0,545438586	0,367788903	1,779647	9732,551	11089,63	36,96542
3,1	0,563619872	0,380048533	1,797921	9633,633	11342,81	37,80937
3,2	0,581801158	0,392308163	1,816275	9536,28	11590,39	38,63462
3,3	0,599982445	0,404567793	1,834708	9440,471	11832,5	39,44167
3,4	0,618163731	0,416827423	1,853217	9346,185	12069,3	40,23101
3,5	0,636345017	0,429087054	1,8718	9253,398	12300,94	41,00312
3,6	0,654526303	0,441346684	1,890454	9162,087	12527,54	41,75847
3,7	0,672707589	0,453606314	1,909179	9072,23	12749,25	42,49751
3,8	0,690888876	0,465865944	1,92797	8983,804	12966,2	43,22067
3,9	0,709070162	0,478125574	1,946828	8896,786	13178,52	43,9284
4	0,727251448	0,490385204	1,965749	8811,151	13386,33	44,6211
4,1	0,745432734	0,502644834	1,984732	8726,877	13589,75	45,29918

Distância (km)	R (Ω /km)	X (Ω /km)	Zcc (Ω)	Icc (A)	Ur (V)	Ur (%)
4,2	0,76361402	0,514904464	2,003775	8643,94	13788,91	45,96303
4,3	0,781795307	0,527164094	2,022876	8562,317	13983,91	46,61304
4,4	0,799976593	0,539423724	2,042035	8481,985	14174,87	47,24957
4,5	0,818157879	0,551683355	2,061248	8402,922	14361,9	47,87299
4,6	0,836339165	0,563942985	2,080515	8325,104	14545,09	48,48364
4,7	0,854520451	0,576202615	2,099835	8248,51	14724,56	49,08186
4,8	0,872701738	0,588462245	2,119205	8173,115	14900,4	49,66798
4,9	0,890883024	0,600721875	2,138625	8098,9	15072,7	50,24233
5	0,90906431	0,612981505	2,158092	8025,841	15241,56	50,80521
5,1	0,927245596	0,625241135	2,177607	7953,918	15407,08	51,35692
5,2	0,945426882	0,637500765	2,197167	7883,11	15569,33	51,89775
5,3	0,963608169	0,649760395	2,216771	7813,394	15728,4	52,428
5,4	0,981789455	0,662020025	2,236419	7744,751	15884,38	52,94792
5,5	0,999970741	0,674279656	2,256108	7677,161	16037,34	53,45779
5,6	1,018152027	0,686539286	2,275839	7610,604	16187,36	53,95787
5,7	1,036333313	0,698798916	2,295609	7545,059	16334,52	54,44841
5,8	1,0545146	0,711058546	2,315418	7480,509	16478,89	54,92964
5,9	1,072695886	0,723318176	2,335266	7416,933	16620,55	55,40182
6	1,090877172	0,735577806	2,35515	7354,313	16759,55	55,86516
6,1	1,109058458	0,747837436	2,37507	7292,632	16895,97	56,31989
6,2	1,127239744	0,760097066	2,395025	7231,87	17029,87	56,76622
6,3	1,145421031	0,772356696	2,415014	7172,011	17161,31	57,20436
6,4	1,163602317	0,784616326	2,435037	7113,037	17290,36	57,63452
6,5	1,181783603	0,796875957	2,455092	7054,932	17417,07	58,0569
6,6	1,199964889	0,809135587	2,475179	6997,678	17541,5	58,47168
6,7	1,218146175	0,821395217	2,495297	6941,26	17663,71	58,87905
6,8	1,236327462	0,833654847	2,515446	6885,662	17783,76	59,27919
6,9	1,254508748	0,845914477	2,535624	6830,867	17901,68	59,67228
7	1,272690034	0,858174107	2,55583	6776,862	18017,54	60,05848
7,1	1,29087132	0,870433737	2,576065	6723,63	18131,39	60,43796
7,2	1,309052606	0,882693367	2,596327	6671,157	18243,26	60,81088
7,3	1,327233893	0,894952997	2,616617	6619,429	18353,22	61,1774
7,4	1,345415179	0,907212627	2,636932	6568,431	18461,3	61,53767
7,5	1,363596465	0,919472258	2,657273	6518,151	18567,55	61,89183
7,6	1,381777751	0,931731888	2,67764	6468,573	18672,01	62,24003
7,7	1,399959037	0,943991518	2,69803	6419,686	18774,72	62,5824
7,8	1,418140324	0,956251148	2,718445	6371,477	18875,72	62,91908
7,9	1,43632161	0,968510778	2,738883	6323,932	18975,06	63,2502
8	1,454502896	0,980770408	2,759344	6277,039	19072,77	63,57589
8,1	1,472684182	0,993030038	2,779827	6230,786	19168,88	63,89627
8,2	1,490865468	1,005289668	2,800332	6185,162	19263,44	64,21147
8,3	1,509046755	1,017549298	2,820859	6140,154	19356,48	64,52159
8,4	1,527228041	1,029808928	2,841406	6095,752	19448,02	64,82675
8,5	1,545409327	1,042068559	2,861974	6051,944	19538,12	65,12706
8,6	1,563590613	1,054328189	2,882562	6008,719	19626,79	65,42263
8,7	1,581771899	1,066587819	2,90317	5966,067	19714,07	65,71357
8,8	1,599953186	1,078847449	2,923797	5923,977	19799,99	65,99997
8,9	1,618134472	1,091107079	2,944443	5882,44	19884,58	66,28193
9	1,636315758	1,103366709	2,965107	5841,445	19967,87	66,55956
9,1	1,654497044	1,115626339	2,985789	5800,982	20049,88	66,83294
9,2	1,67267833	1,127885969	3,006489	5761,042	20130,65	67,10216
9,3	1,690859617	1,140145599	3,027206	5721,615	20210,19	67,36731
9,4	1,709040903	1,152405229	3,04794	5682,693	20288,55	67,62849
9,5	1,727222189	1,16466486	3,068691	5644,266	20365,73	67,88577
9,6	1,745403475	1,17692449	3,089458	5606,326	20441,77	68,13923
9,7	1,763584761	1,18918412	3,110241	5568,864	20516,69	68,38896
9,8	1,781766048	1,20144375	3,131039	5531,872	20590,51	68,63503
9,9	1,799947334	1,21370338	3,151853	5495,341	20663,26	68,87752
10	1,81812862	1,22596301	3,172682	5459,264	20734,95	69,1165
10,1	1,836309906	1,23822264	3,193526	5423,632	20805,61	69,35204
10,2	1,854491192	1,25048227	3,214384	5388,438	20875,26	69,58421
10,3	1,872672479	1,2627419	3,235256	5353,675	20943,93	69,81309
10,4	1,890853765	1,27500153	3,256142	5319,334	21011,62	70,03873
10,5	1,909035051	1,28726116	3,277042	5285,41	21078,36	70,26121
10,6	1,927216337	1,299520791	3,297955	5251,894	21144,17	70,48058
10,7	1,945397623	1,311780421	3,318881	5218,779	21209,07	70,6969

Distância (km)	R (Ω /km)	X (Ω /km)	Zcc (Ω)	Icc (A)	Ur (V)	Ur (%)
10,8	1,96357891	1,324040051	3,33982	5186,06	21273,07	70,91024
10,9	1,981760196	1,336299681	3,360772	5153,729	21336,2	71,12066
11	1,999941482	1,348559311	3,381736	5121,78	21398,46	71,32821
11,1	2,018122768	1,360818941	3,402712	5090,207	21459,88	71,53294
11,2	2,036304054	1,373078571	3,4237	5059,003	21520,47	71,73492
11,3	2,054485341	1,385338201	3,4447	5028,162	21580,26	71,93419
11,4	2,072666627	1,397597831	3,465711	4997,678	21639,24	72,1308
11,5	2,090847913	1,409857461	3,486734	4967,545	21697,44	72,32481
11,6	2,109029199	1,422117092	3,507768	4937,758	21754,88	72,51627
11,7	2,127210485	1,434376722	3,528812	4908,311	21811,57	72,70522
11,8	2,145391772	1,446636352	3,549868	4879,198	21867,51	72,89171
11,9	2,163573058	1,458895982	3,570933	4850,415	21922,74	73,07579
12	2,181754344	1,471155612	3,59201	4821,955	21977,25	73,25749

Caso 4

Tabela 14: Dados da linha MT do Caso 4

Imp. Linha(Ω /ml) Z=R+jX		Imp. Linha(Ω /km) Z=R+jX	
R	X	R	X
1,2936	0,6713	0,803804	0,417125681

Z rede montante	Zcc'=1,8
Rcc=0,18	Xcc=1,791

Scc (MVA)	Un (kV)
700	30

Ω /ml \rightarrow Ω /km
0,62137

Tabela 15: Resultados dos cálculos realizados para o Caso 4

Distância (km)	R (Ω)	X (Ω)	Zcc (Ω)	Icc (A)	Ur (V)	Ur (%)
0,1	0,080380423	0,041712568	1,337422	12950,67	2031,351	6,771169
0,2	0,160760846	0,083425136	1,393088	12433,18	3900,361	13,0012
0,3	0,24114127	0,125137704	1,452272	11926,49	5612,118	18,70706
0,4	0,321521693	0,166850272	1,51456	11436	7175,08	23,91693
0,5	0,401902116	0,208562841	1,579587	10965,21	8599,63	28,66543
0,6	0,482282539	0,250275409	1,647028	10516,22	9897,004	32,99001
0,7	0,562662962	0,291987977	1,716597	10090,02	11078,55	36,92851
0,8	0,643043386	0,333700545	1,788048	9686,827	12155,26	40,51754
0,9	0,723423809	0,375413113	1,861162	9306,287	13137,47	43,79156
1	0,803804232	0,417125681	1,935752	8947,689	14034,72	46,78239
1,1	0,884184655	0,458838249	2,011653	8610,085	14855,69	49,51897
1,2	0,964565078	0,500550817	2,088723	8292,389	15608,23	52,02743
1,3	1,044945502	0,542263385	2,166837	7993,452	16299,36	54,33119
1,4	1,125325925	0,583975953	2,245886	7712,106	16935,33	56,45111
1,5	1,205706348	0,625688522	2,325774	7447,202	17521,74	58,40579
1,6	1,286086771	0,66740109	2,406418	7197,631	18063,52	60,21172
1,7	1,366467194	0,709113658	2,487744	6962,334	18565,07	61,88355
1,8	1,446847618	0,750826226	2,569689	6740,314	19030,29	63,43429

Distância (km)	R (Ω)	X (Ω)	Zcc (Ω)	Icc (A)	Ur (V)	Ur (%)
1,9	1,527228041	0,792538794	2,652193	6530,636	19462,64	64,87547
2	1,607608464	0,834251362	2,735207	6332,429	19865,21	66,21736
2,1	1,687988887	0,87596393	2,818686	6144,887	20240,72	67,46906
2,2	1,76836931	0,917676498	2,90259	5967,26	20591,61	68,63871
2,3	1,848749734	0,959389066	2,986882	5798,859	20920,07	69,73357
2,4	1,929130157	1,001101634	3,071531	5639,047	21228,03	70,7601
2,5	2,00951058	1,042814203	3,156508	5487,237	21517,24	71,72412
2,6	2,089891003	1,084526771	3,241787	5342,888	21789,25	72,63082
2,7	2,170271426	1,126239339	3,327346	5205,503	22045,46	73,48487
2,8	2,25065185	1,167951907	3,413162	5074,622	22287,15	74,29049
2,9	2,331032273	1,209664475	3,499218	4949,823	22515,44	75,05146
3	2,411412696	1,251377043	3,585495	4830,716	22731,36	75,77122
3,1	2,491793119	1,293089611	3,671978	4716,942	22935,86	76,45285
3,2	2,572173542	1,334802179	3,758654	4608,168	23129,75	77,09918
3,3	2,652553966	1,376514747	3,845508	4504,088	23313,83	77,71275
3,4	2,732934389	1,418227315	3,93253	4404,419	23488,77	78,29589
3,5	2,813314812	1,459939884	4,019708	4308,897	23655,22	78,85072
3,6	2,893695235	1,501652452	4,107032	4217,281	23813,75	79,37916
3,7	2,974075658	1,54336502	4,194494	4129,344	23964,9	79,88299
3,8	3,054456082	1,585077588	4,282084	4044,878	24109,14	80,36381
3,9	3,134836505	1,626790156	4,369795	3963,689	24246,94	80,82313
4	3,215216928	1,668502724	4,45762	3885,595	24378,69	81,26229
4,1	3,295597351	1,710215292	4,545553	3810,43	24504,76	81,68255
4,2	3,375977774	1,75192786	4,633586	3738,035	24625,52	82,08507
4,3	3,456358198	1,793640428	4,721715	3668,266	24741,27	82,4709
4,4	3,536738621	1,835352996	4,809935	3600,986	24852,32	82,84105
4,5	3,617119044	1,877065565	4,89824	3536,068	24958,92	83,19641
4,6	3,697499467	1,918778133	4,986625	3473,393	25061,35	83,53783
4,7	3,77787989	1,960490701	5,075087	3412,849	25159,83	83,8661
4,8	3,858260314	2,002203269	5,163622	3354,333	25254,58	84,18193
4,9	3,938640737	2,043915837	5,252227	3297,746	25345,8	84,486
5	4,01902116	2,085628405	5,340896	3242,997	25433,68	84,77894
5,1	4,099401583	2,127340973	5,429628	3189,999	25518,4	85,06134
5,2	4,179782006	2,169053541	5,518419	3138,672	25600,12	85,33373
5,3	4,26016243	2,210766109	5,607267	3088,939	25678,99	85,59664
5,4	4,340542853	2,252478677	5,696169	3040,729	25755,16	85,85053
5,5	4,420923276	2,294191246	5,785122	2993,974	25828,76	86,09586
5,6	4,501303699	2,335903814	5,874125	2948,611	25899,91	86,33303
5,7	4,581684122	2,377616382	5,963174	2904,579	25968,73	86,56244
5,8	4,662064546	2,41932895	6,052268	2861,821	26035,34	86,78446
5,9	4,742444969	2,461041518	6,141404	2820,285	26099,83	86,99943
6	4,822825392	2,502754086	6,230582	2779,918	26162,3	87,20768
6,1	4,903205815	2,544466654	6,319799	2740,674	26222,85	87,4095
6,2	4,983586238	2,586179222	6,409054	2702,506	26281,56	87,60519
6,3	5,063966662	2,62789179	6,498345	2665,372	26338,51	87,79502
6,4	5,144347085	2,669604358	6,58767	2629,231	26393,77	87,97924
6,5	5,224727508	2,711316927	6,677029	2594,044	26447,43	88,15809
6,6	5,305107931	2,753029495	6,76642	2559,774	26499,54	88,3318
6,7	5,385488354	2,794742063	6,855841	2526,387	26550,18	88,50059
6,8	5,465868778	2,836454631	6,945292	2493,849	26599,4	88,66465
6,9	5,546249201	2,878167199	7,034771	2462,128	26647,26	88,82418
7	5,626629624	2,919879767	7,124277	2431,195	26693,81	88,97937
7,1	5,707010047	2,961592335	7,21381	2401,021	26739,11	89,13038
7,2	5,78739047	3,003304903	7,303368	2371,578	26783,21	89,27737
7,3	5,867770894	3,045017471	7,392951	2342,841	26826,15	89,42051
7,4	5,948151317	3,086730039	7,482557	2314,785	26867,98	89,55994
7,5	6,02853174	3,128442608	7,572185	2287,386	26908,74	89,69581
7,6	6,108912163	3,170155176	7,661836	2260,621	26948,47	89,82823
7,7	6,189292586	3,211867744	7,751507	2234,47	26987,21	89,95735
7,8	6,26967301	3,253580312	7,841199	2208,911	27024,99	90,08328

Distância (km)	R (Ω)	X (Ω)	Zcc (Ω)	Icc (A)	Ur (V)	Ur (%)
7,9	6,350053433	3,29529288	7,930911	2183,924	27061,84	90,20614
8	6,430433856	3,337005448	8,020642	2159,492	27097,81	90,32604
8,1	6,510814279	3,378718016	8,110391	2135,595	27132,92	90,44308
8,2	6,591194702	3,420430584	8,200158	2112,216	27167,21	90,55736
8,3	6,671575126	3,462143152	8,289942	2089,34	27200,69	90,66897
8,4	6,751955549	3,50385572	8,379743	2066,95	27233,4	90,77802
8,5	6,832335972	3,545568289	8,46956	2045,03	27265,37	90,88457
8,6	6,912716395	3,587280857	8,559393	2023,567	27296,62	90,98873
8,7	6,993096818	3,628993425	8,649241	2002,547	27327,17	91,09056
8,8	7,073477242	3,670705993	8,739103	1981,955	27357,04	91,19015
8,9	7,153857665	3,712418561	8,82898	1961,779	27386,27	91,28756
9	7,234238088	3,754131129	8,91887	1942,007	27414,86	91,38286
9,1	7,314618511	3,795843697	9,008774	1922,626	27442,84	91,47613
9,2	7,394998934	3,837556265	9,098691	1903,626	27470,23	91,56742
9,3	7,475379358	3,879268833	9,188621	1884,995	27497,04	91,65681
9,4	7,555759781	3,920981401	9,278563	1866,723	27523,3	91,74433
9,5	7,636140204	3,96269397	9,368516	1848,799	27549,02	91,83006
9,6	7,716520627	4,004406538	9,458482	1831,214	27574,22	91,91405
9,7	7,79690105	4,046119106	9,548458	1813,959	27598,9	91,99635
9,8	7,877281474	4,087831674	9,638445	1797,023	27623,1	92,07701
9,9	7,957661897	4,129544242	9,728443	1780,399	27646,82	92,15607
10	8,03804232	4,17125681	9,818452	1764,077	27670,08	92,23359
10,1	8,118422743	4,212969378	9,90847	1748,051	27692,88	92,3096
10,2	8,198803166	4,254681946	9,998498	1732,311	27715,25	92,38416
10,3	8,27918359	4,296394514	10,08854	1716,851	27737,19	92,4573
10,4	8,359564013	4,338107082	10,17858	1701,662	27758,72	92,52906
10,5	8,439944436	4,37981965	10,26864	1686,739	27779,84	92,59948
10,6	8,520324859	4,421532219	10,3587	1672,073	27800,58	92,66859
10,7	8,600705282	4,463244787	10,44878	1657,659	27820,93	92,73645
10,8	8,681085706	4,504957355	10,53886	1643,49	27840,92	92,80306
10,9	8,761466129	4,546669923	10,62895	1629,56	27860,54	92,86848
11	8,841846552	4,588382491	10,71905	1615,863	27879,82	92,93273
11,1	8,922226975	4,630095059	10,80915	1602,393	27898,75	92,99584
11,2	9,002607398	4,671807627	10,89926	1589,145	27917,35	93,05784
11,3	9,082987822	4,713520195	10,98938	1576,113	27935,63	93,11877
11,4	9,163368245	4,755232763	11,07951	1563,292	27953,59	93,17864
11,5	9,243748668	4,796945331	11,16964	1550,677	27971,25	93,23749
11,6	9,324129091	4,8386579	11,25979	1538,263	27988,6	93,29534
11,7	9,404509514	4,880370468	11,34993	1526,045	28005,67	93,35222
11,8	9,484889938	4,922083036	11,44009	1514,019	28022,44	93,40814
11,9	9,565270361	4,963795604	11,53025	1502,18	28038,94	93,46315
12	9,645650784	5,005508172	11,62042	1490,524	28055,17	93,51724