



TÉCNICO
LISBOA

Projecto de Micro-rede eléctrica autónoma com elevados requisitos de fiabilidade para Instalações Militares

Pedro Jorge Fernandes Domingos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Doutor José Luís Costa Pinto de Sá

Júri

Presidente: Prof. Doutor Rui Manuel Gameiro de Castro

Orientador: Prof. Doutor José Luís Costa Pinto de Sá

Vogal: Prof. Doutor José Manuel Dias Ferreira de Jesus

Novembro de 2018

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Aos meus pais, agradeço do fundo do coração o afecto, educação e apoio incondicional que sempre me proporcionaram, bem como a forma como rejubilam com as minhas vitórias e me dão estabilidade em momentos menos positivos. À Sofia, por todo o carinho, compreensão, companhia e pela forma como sempre me incentivou e me fez acreditar nas minhas capacidades.

Ao Professor José Luís Costa Pinto de Sá, o meu obrigado pela confiança e pela oportunidade que me deu de participar num projeto extremamente interessante com aplicação a um caso de estudo real. Todos os ensinamentos e conhecimento técnico que me transmitiu ao longo deste trabalho, terei em conta ao longo do meu percurso profissional.

Um agradecimento ao Coronel Ferrão, por me ter aberto as portas do Campo Militar de Santa Margarida (CMSM) para que pudesse iniciar o meu estudo que viria a culminar nesta Dissertação. Agradeço também ao Aspirante Moreira e ao Sr. Grilo, que durante as minhas duas semanas de estadia no CMSM, me proporcionaram as condições necessárias para realizar o meu trabalho de reconhecimento da instalação militar.

A todos os professores que fizeram parte do meu percurso académico, agradeço por todo o conhecimento transmitido e pela forma como contribuíram para me tornar na pessoa que sou hoje.

A todos os meus familiares e amigos que têm assistido ao meu percurso de vida e que sempre me apoiaram nos bons e maus momentos.

Resumo

O paradigma atual revela a evolução das infraestruturas e serviços no sentido da digitalização, potenciando a otimização de recursos e a fiabilidade dos sistemas, mas criando novos desafios. Na maioria dos países, a operacionalidade de serviços críticos assenta atualmente em sistemas que requerem um fornecimento ininterrupto de energia.

Como alicerce da segurança nacional, as forças militares não podem ver comprometidas as suas operações. Deste modo, as instalações militares devem sofrer uma modernização, com o intuito de promover a sua autonomia e imunidade face a fatores externos, como interrupções da rede elétrica de serviço público, adotando-se tecnologias micro-rede para melhoria das suas condições de exploração e segurança. Neste âmbito, é desenvolvido um projeto para o Campo Militar de Santa Margarida (CMSM).

Inicialmente, procede-se ao reconhecimento e à caracterização da rede elétrica do CMSM, criando-se um modelo matemático para simulação do seu comportamento em regime estacionário para diferentes condições de exploração.

Devido às limitações identificadas, propõem-se reestruturações na rede existente com vista à implementação de uma micro-rede, sendo essencial a integração de uma unidade de geração própria. Atendendo à especificidade do CMSM, uma central de biomassa revela-se como a solução mais vantajosa, analisando-se hipóteses de integração da mesma.

A idealização de um sistema de automação faz igualmente parte do projeto, propondo-se automatismos, especificados e validados através de Redes de Petri, para proporcionar uma gestão automatizada e intervir em situações de perturbação da estabilidade da micro-rede. Por último, são tecidas considerações acerca da implementação dos automatismos e da arquitetura de comunicações do sistema.

Palavras-chave: Instalações Militares, Micro-redes, Modelação e Simulação de Redes Elétricas, Automação, Redes de Petri, CEI 61850

Abstract

The actual paradigm reveals an evolution of infrastructures and services to digitalization, empowering resources optimization and systems reliability, but bringing new challenges. In most countries, the functionality of critical services is now based on systems which require an uninterrupted power supply.

Military forces as a pillar of national security cannot have their operations compromised. Therefore, military installations should be modernized in order to reinforce their autonomy and immunity against external factors, such as utility grid outages. In this perspective, microgrid technologies can be applied to enhance the security and operating conditions of military facilities. Within this scope, a project regarding the Campo Militar de Santa Margarida (CMSM) case study is developed.

Initially, it's carried out the CMSM's electrical grid acknowledgement and characterization, being created a mathematical model to perform a steady-state analysis for different grid operating conditions.

Due to identified technical limitations, some improvements in the existing grid are recommended in order to allow the implementation of a microgrid, being the integration of distributed energy resources one of the main issues. According to CMSM's specificity, a biomass power plant becomes the more profitable solution and options for its integration are analyzed.

The development of a microgrid automation system is also an explored topic and a set of automatisms, specified and validated using Petri Nets, is proposed to provide an automated management and to intervene over microgrid stability perturbations. Finally, some considerations are made regarding a standardized implementation of automatisms and the communication system architecture.

Keywords: Military Installations, Microgrids, Electrical Grid Modeling and Simulation, Automation, Petri Nets, IEC 61850

Conteúdo

Declaração	iii
Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Lista de Figuras	xvii
Lista de Tabelas	xxi
Lista de Símbolos	xxiii
Lista de Acrónimos	xxv
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Organização da Dissertação	3
2 Rede de Média Tensão do CMSM	5
2.1 Reconhecimento da rede	5
2.1.1 Descrição da rede	7
2.1.2 Avaliação de consumos	10
2.2 Elementos da rede	14
2.2.1 Transformadores	15
2.2.2 Cabos subterrâneos	17
2.2.3 Linha aérea	19
2.2.4 Rede de distribuição a montante	20
2.2.5 Cargas	21
2.3 Trânsito de Energia	22

2.3.1	Cenários de carga	22
2.3.2	Topologias de exploração	24
2.3.3	Simulações do Trânsito de Energia	26
2.3.4	Análise de resultados	32
2.4	Correntes de curto-circuito	35
2.4.1	Cálculo das correntes de curto-circuito	35
2.4.2	Tensões pós- defeito	38
2.4.3	Análise dos resultados	39
3	Integração de Unidade de Produção para Autoconsumo	41
3.1	Enquadramento legislativo das UPAC's	41
3.2	Dimensionamento da central de biomassa	42
3.2.1	Cenário de carga	42
3.2.2	Soluções de integração	43
3.2.3	Especificação do gerador da central	46
3.3	Modos de exploração da micro-rede	47
3.4	Trânsito de Energia	47
3.4.1	Resultados: Modo ilha	50
3.4.2	Resultados: Modo paralelo	52
3.4.3	Resultados: Interrupção de serviço da central	54
3.4.4	Análise dos resultados	55
3.5	Correntes de curto-circuito	57
3.5.1	Resultados: Modo ilha	57
3.5.2	Resultados: Modo paralelo	62
3.5.3	Análise de resultados	63
4	Princípios Operacionais de Automação da rede de MT	67

4.1	Princípios de exploração da rede	67
4.1.1	Condicionamentos gerais de exploração	68
4.1.2	Requisitos básicos de proteção	69
4.2	Automatismos	70
4.2.1	Deslastre-Reposição por Mínimo de Frequência	70
4.2.2	Deslastre-Reposição por Tensão Zero	71
4.2.3	Operação de Recurso	72
4.2.4	Interligação Automática da Micro-rede	74
4.3	Reestruturação da rede atual	76
4.3.1	Solução básica	77
4.3.2	Solução intermédia	78
4.3.3	Solução avançada	79
5	Especificação dos Automatismos por Redes de Petri	81
5.1	Introdução às Redes de Petri	81
5.1.1	Estrutura das Redes de Petri	82
5.1.2	Funcionamento das Redes de Petri	83
5.1.3	Interpretação das Redes de Petri	83
5.2	Automatismo de Interligação Automática da Micro-rede (IAMR)	84
5.2.1	Autómatos modeladores	85
5.2.2	Automatismo de Operação de Recurso	89
5.2.3	Automatismo de Gestão da Interligação	94
5.2.4	Automatismo completo de IAMR	96
5.3	Considerações sobre a implementação dos automatismos	100
5.3.1	Implementação normalizada	100
5.3.2	Arquitetura do SPCC	101

6 Conclusões	103
6.1 Considerações finais	103
6.2 Trabalhos futuros	104
Referências	105
A Registo de diagramas de carga	107
B Modelação da rede em <i>Simulink</i>	109
B.1 Blocos modeladores	109
B.1.1 Transformadores	109
B.1.2 Ramais	110
B.1.3 Rede a montante	110
B.1.4 Cargas	111
B.1.5 Central de Biomassa	112
B.1.6 Equipamentos de corte	113
B.1.7 Curto-circuitos	114
B.2 Ferramentas de cálculo	114
B.2.1 <i>RLC Line Parameters</i>	114
B.2.2 <i>Load Flow</i>	117
B.2.3 <i>Machine Initialization</i>	118
B.2.4 Cálculo das correntes de curto-circuito	118
B.3 Modelo completo	120
C Propriedades das Redes de Petri	123
C.1 Propriedades dinâmicas	123
C.2 Propriedades estruturais	124

D	Análise estrutural das Redes de Petri	127
D.1	Análise Estrutural do automatismo de AOR	127
D.2	Análise Estrutural do automatismo de GI	128
D.3	Análise Estrutural do automatismo de IAMR	129

Lista de Figuras

2.1	Esquema unifilar da Rede de Média Tensão do CMSM.	6
2.2	Esquema unifilar da topologia atual de exploração (Topologia I).	8
2.3	Histórico de pontas de carga da instalação.	10
2.4	Relação entre as pontas de Setembro e Janeiro.	13
2.5	Esquema monofásico equivalente do transformador no <i>Simulink</i>	15
2.6	Esquema unifilar da Topologia II.	25
2.7	Esquema unifilar da Topologia III.	26
2.8	Cenário de carga: I; Topologia: I; Receção: PT Cav. Torre.	28
2.9	Cenário de carga: I; Topologia: I; Receção: PT Correios.	29
2.10	Cenário de carga: II; Topologia: I; Receção: PT Cav. Torre.	30
2.11	Cenário de carga: II; Topologia: I; Receção: PT Correios.	31
2.12	Potência reativa gerada na rede de MT.	33
2.13	Correntes de curto-circuito (I''_{k3}) na rede atual (SE a montante: SE Olho de Boi).	36
2.14	Correntes de curto-circuito (I''_{k3}) na rede atual (SE a montante: SE Almourol).	37
2.15	Tensões pós-defeito para c.c. na BT (Receção: PT Cav. Torre).	38
2.16	Tensões pós-defeito para c.c. na MT (Receção: PT Cav. Torre).	39
3.1	Simulação da rede no modo ilha (Solução: A - Injeção na BT).	50
3.2	Simulação da rede no modo ilha (Solução: B - Injeção na MT).	51
3.3	Simulação da rede no modo paralelo (Solução: A - Injeção na BT; Receção: PT Cav. Torre).	52
3.4	Simulação da rede no modo paralelo (Solução: B - Injeção na MT; Receção: PT Cav. Torre).	53
3.5	Simulação da central fora de serviço (Solução: A - Injeção na BT; Receção: PT Cav. Torre).	54
3.6	Correntes de curto-circuito (I''_{k3}) na rede em modo ilha (Solução: A - Injeção na BT).	58
3.7	Correntes de curto-circuito (I''_{k3}) na rede em modo ilha (Solução: B - Injeção na MT).	59

3.8	Tensões pós-defeito para c.c. na BT (Solução: A - Injeção na BT).	60
3.9	Tensões pós-defeito para c.c. na BT (Solução: B - Injeção na BT).	60
3.10	Tensões pós-defeito para c.c. na MT (Solução: A - Injeção na BT).	61
3.11	Tensões pós-defeito para c.c. na MT (Solução: B - Injeção na MT).	61
3.12	Tensões pós-defeito para c.c. na BT (Solução: A - Injeção na BT; Receção: PT Cav. Torre).	62
3.13	Tensões pós-defeito para c.c. na BT (Solução: B - Injeção na MT; Receção: PT Cav. Torre).	63
4.1	Esquema unifilar da micro-rede do CMSM.	68
4.2	Exemplo prático de operação de recurso na micro-rede do CMSM.	73
4.3	Representação simplificada das fontes de alimentação da micro-rede.	74
4.4	Fluxograma de funcionamento do automatismo de Interligação Automática da Micro-rede.	76
4.5	Esquema unifilar da micro-rede com as alterações referentes à solução básica.	77
4.6	Esquema unifilar da micro-rede com as alterações referentes à solução intermédia.	79
4.7	Esquema unifilar da micro-rede com as alterações referentes à solução avançada.	80
5.1	Exemplo de representação de uma Rede de Petri.	83
5.2	Interface gráfica do <i>software</i> TINA 3.4.4.	85
5.3	Rede de Petri interpretada do autómato modelador da Micro-rede.	86
5.4	Rede de Petri interpretada do autómato modelador de Linha.	87
5.5	Rede de Petri interpretada do autómato modelador de Barramento.	89
5.6	Legenda dos lugares e transições de AOR.	90
5.7	Rede de Petri interpretada do automatismo de AOR (módulo A).	91
5.8	Rede de Petri interpretada do automatismo de AOR (módulo B).	91
5.9	Rede de Petri interpretada do automatismo de GI.	95
5.10	Interação entre os automatismos de GI e AOR.	97
5.11	Arquitetura do SPCC da micro-rede: Implementação centralizada dos automatismos.	102

A.1	Diagrama de carga do PT Cavalaria Monobloco (18/09 - 19/09).	107
A.2	Diagrama de carga do PT GAC (19/09 - 20/09).	107
A.3	Diagrama de carga do PT 1ªBIMEC (20/09 - 21/09).	107
A.4	Diagrama de carga do PT Correios (20/09 - 21/09).	108
A.5	Diagrama de carga do PT Unidade de Apoio (21/09 - 22/09).	108
A.6	Diagrama de carga do PT Transmissões (21/09 - 22/09).	108
B.1	Bloco Simulink modelador de transformador	109
B.2	Bloco Simulink modelador do esquema equivalente em II de linha trifásica	110
B.3	Bloco <i>Simulink</i> modelador de tensão trifásica	111
B.4	Bloco <i>Simulink</i> modelador de carga trifásica	111
B.5	Modelo <i>Simulink</i> da Central de Biomassa.	112
B.6	Bloco <i>Simulink</i> modelador de máquina síncrona.	113
B.7	Bloco <i>Simulink</i> modelador de disjuntor	113
B.8	Bloco <i>Simulink</i> modelador de curto-circuito	114
B.9	Interface gráfica da ferramenta <i>RLC Line Parameters</i> .	115
B.10	Referencial XY dos condutores aéreos no <i>RLC Line Parameters</i> .	116
B.11	Interface gráfica da ferramenta <i>Load Flow</i> .	117
B.12	Interface gráfica da ferramenta <i>Machine Initialization</i> .	118
B.13	Bloco <i>Simulink</i> modelador de multímetro trifásico	119
B.14	Oscilografias de tensão e corrente no <i>Simulink</i> .	119
B.15	Modelo <i>Simulink</i> completo da rede atual do CMSM.	120
B.16	Modelo <i>Simulink</i> completo da rede do CMSM com a integração da Central de Biomassa.	121
D.1	RdP utilizada na análise estrutural de AOR.	127
D.2	Rede de Petri do automatismo de IAMR.	131

Lista de Tabelas

2.1	Ramais existentes na rede de MT do CMSM	7
2.2	Dados das faturas de eletricidade	11
2.3	Escala de medições para o registo de diagramas de carga	13
2.4	Estimação das potências máximas de Janeiro	14
2.5	Parâmetros dos transformadores (1)	15
2.6	Parâmetros dos transformadores (2)	16
2.7	Parâmetros do cabo monopolar <i>LXHIOZ1</i> (1)	17
2.8	Parâmetros do cabo monopolar <i>LXHIOZ1</i> (2)	17
2.9	Componentes simétricas da impedância e capacitância dos cabos	19
2.10	Especificações técnicas do condutor AA 50	19
2.11	Componentes simétricas da linha aérea	20
2.12	Potências de curto-circuito máximas e mínimas nas Subestações	21
2.13	Ligações entre as Subestações de Distribuição e o CMSM	21
2.14	Variação da $\tan \phi_{med}$ da instalação com o fator de potência das cargas	23
2.15	Cenário de carga I	23
2.16	Cenário de carga II	24
2.17	Resultados das simulações do TE	32
3.1	Cenário de carga III	43
3.2	Parâmetros do transformador elevador a montante da central	46
3.3	Parâmetros dos geradores síncronos - características elétricas	46
3.4	Parâmetros dos geradores síncronos - constantes de tempo	46
3.5	Resultados das simulações do TE	55
3.6	Resultados das correntes de curto-circuito	63

5.1	Interpretação da RdP do autômato modelador da Micro-rede	86
5.2	Interpretação da RdP do autômato modelador de Linha	88
5.3	Interpretação da RdP do autômato modelador de Barramento	89
5.4	Interpretação dos lugares da RdP do automatismo de AOR	92
5.5	Interpretação das transições da RdP do automatismo de AOR	93
5.6	Modificação dos predicados para seleção pré-definida do ponto de interligação	94
5.7	Interpretação dos lugares da RdP do automatismo de AOR	96
5.8	Interpretação das transições da RdP do automatismo de GI	96
5.9	Interações entre os autômatos modeladores e automatismos	98
D.1	Análise estrutural da RdP de AOR - Propriedades dinâmicas e estruturais	128
D.2	Análise estrutural da RdP de GI - Propriedades dinâmicas e estruturais	129
D.3	Análise estrutural da RdP de IAMR - Propriedades dinâmicas e invariantes de lugares	129
D.4	Análise estrutural da RdP de IAMR - Invariantes de transições	130

Lista de Símbolos

a_m	Distância geométrica entre os condutores (m).
α	Coefficiente de variação da resistividade ($^{\circ}\text{C}^{-1}$).
$\cos \phi$	Cosseno do ângulo de defasagem entre as ondas de tensão e corrente (fator de potência).
d	Diâmetro (m).
f	Frequência da rede elétrica (Hz).
H	Constante de inércia da máquina síncrona (s).
h_s	Profundidade equivalente de retorno pelo solo.
I	Corrente elétrica (A).
L	Indutância (H).
P	Potência ativa (W).
Q	Potência reativa (var).
S	Potência aparente (VA).
ρ	Resistividade elétrica ($\Omega \cdot \text{m}$).
R	Resistência elétrica (Ω).
T	Constante de tempo da máquina síncrona (s).
$\tan \phi$	Tangente do ângulo de defasagem entre as ondas de tensão e corrente.
U	Tensão elétrica (em V).
X	Reatância (Ω).
Z	Impedância (Ω).

Lista de Acrónimos

AA	Alumínio-aço (condutor).
AOR	Automatismo de Operação de Recurso.
AT	Alta Tensão.
BT	Baixa Tensão.
CMSM	Campo Militar de Santa Margarida.
CEI	Comissão Eletrotécnica Internacional.
DEI	Dispositivos Eletrónicos Inteligentes.
DIE	Departamento de Infraestruturas do Exército.
DF	Deslastre-Reposição por Mínimo de Frequência.
DU0	Deslastre-Reposição por Tensão Zero.
EDP	Energias de Portugal.
EN	Norma Europeia.
GI	Gestão da Interligação.
GOOSE	<i>Generic Oriented Object Substation Event.</i>
HMI	<i>Human-Machine Interface.</i>
IAMR	Interligação Automática da Micro-rede.
LAAS	<i>Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes.</i>
MAT	Muito Alta Tensão.
MGCC	<i>Microgrid Central Controller.</i>
MT	Média Tensão.
PCC	<i>Point of Common Coupling.</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller.</i>
PT	Posto de Transformação.
P.U.	Por Unidade.
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão.
RED	Recursos Energéticos Distribuídos.
RESP	Rede Elétrica de Serviço Público.
RdP	Redes de Petri.

ROCOF	<i>Rate of Change of Frequency.</i>
SE	Subestação.
SPCC	Sistema de Proteção, Comando e Controlo.
SPCC	<i>Software PLC.</i>
TE	Trânsito de Energia.
TI	Transformador de Intensidade.
TT	Transformador de Tensão.
UPAC	Unidade de Produção para Autoconsumo.
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply.</i>
VS	<i>Vector Shift.</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

Atendendo ao contexto civilizacional registado atualmente, o funcionamento fiável da rede de energia elétrica de serviço público é imprescindível na preservação da segurança de um país e na sustentação da sua economia, assegurando a continuidade de operações ligadas a serviços de extrema importância, como a banca, hospitais, distribuição de bens, comunicações e infraestruturas militares. Contudo, a rede pública não é um sistema imune a falhas e está vulnerável a interrupções no seu serviço, as quais podem ter origem em sobrecargas, descargas atmosféricas, danos nas linhas de transporte e, mais recentemente devido à digitalização gradual dos sistemas, ataques cibernéticos. Outro aspeto reside no facto de uma parcela significativa da energia elétrica gerada a nível mundial ter a sua génese em combustíveis fósseis, apesar de se assistir a uma diminuição gradual desta dependência, como se pode constatar pelo aumento significativo da potência instalada em geração renovável a nível global.

Com o intuito de promover uma maior segurança no fornecimento de energia elétrica, com especial atenção para os serviços de missão crítica de um país, torna-se importante desenvolver e aplicar novas tecnologias nesse sentido. É neste ponto que surge o conceito de micro-rede, uma tecnologia *smart grid* que permite a uma rede pública ou privada funcionar independentemente e desconectada da rede pública nacional através da integração de unidades de geração própria, designadas como Recursos Energéticos Distribuídos (RED's), proporcionando uma maior resiliência das suas infraestruturas face a falhas da rede exterior.

O foco deste trabalho incide nas unidades militares que, tratando-se de instalações de carácter crítico de uma nação, não podem ver a continuidade das suas operações comprometidas por influências externas. Nos Estados Unidos da América é notório o interesse real na aplicação de tecnologias de micro-rede em infraestruturas militares, existindo projetos recentes neste âmbito onde se verifica uma aliança entre governo e centros de investigação [1, 2].

No dimensionamento de uma micro-rede com aplicações militares, há que ter em conta os padrões elevados de segurança e de fiabilidade exigidos neste tipo de instalações, devendo-se simultaneamente apostar em práticas que promovam a sustentabilidade ambiental, como a integração de unidades de geração de energia renovável e a adoção de medidas de eficiência energética. O projeto de uma micro-rede com adaptação a uma determinada unidade militar deve ter em consideração as seguintes componentes:

- Seleção e dimensionamento dos RED's, dando primazia a unidades de geração renovável e deixando para último recurso a geração convencional de *backup* (geradores diesel);
- Dimensionamento de um sistema de proteção e automação, capaz de assegurar a proteção tradicional face a defeitos na rede e otimizar as condições de funcionamento da rede de uma forma segura e automatizada;
- Definição de protocolos de segurança que garantam a proteção física da instalação, mas que também assegurem a integridade dos sistemas de comunicação, de controlo e comando da micro-rede face a intrusões externas, através de medidas de cibersegurança.

Este trabalho tem como caso de estudo o Campo Militar de Santa Margarida (CMSM), uma instalação militar do Exército Português com localização no município de Constância, Santarém. Trata-se de uma instalação em atividade desde 1952 e por onde já passaram milhares de militares. Com uma área total ocupada de 6400 ha, o CMSM é uma das maiores instalações militares da Europa, destacando-se atualmente por ser o local onde se encontra o centro de comando da Brigada Mecanizada do Exército.

1.2 Objetivos

Atualmente, o CMSM desempenha um papel importante no seio das operações do Exército e, devido à sua localização central em termos de território nacional, é visto como um nó importante de comunicações, uma vez que estabelece a intercomunicação entre as diversas unidades militares do Exército de norte a sul do país. Como se verá ao longo deste trabalho, aos dias de hoje a rede elétrica do CMSM é tecnologicamente antiquada e não se coaduna com a relevância da instalação.

Desta forma, o principal objetivo deste trabalho consiste no projeto de uma micro-rede que se adapte às necessidades do CMSM e proporcione uma maior segurança e autonomia à instalação militar, procurando reduzir a dependência atual em relação à rede elétrica de serviço público (RESP), bem como os custos de exploração da mesma. Nesse sentido, são propostas alterações ao nível da rede privada de Média Tensão (MT) do CMSM que possibilitem a integração de uma unidade de geração própria (ou RED) e, simultaneamente, de um Sistema de Proteção, Comando e Controlo (SPCC). A junção destas duas componentes é imprescindível no dimensionamento de uma micro-rede capaz de satisfazer os altos requisitos de fiabilidade e segurança, patentes a qualquer unidade militar, e de permitir uma gestão dinâmica e automatizada da rede do CMSM, tendo-se a motivação de que este projeto venha a ser estendido a outras unidades militares portuguesas.

Numa primeira fase, requer-se o conhecimento prévio da instalação associada ao caso de estudo, para que se possa fazer a sua caracterização e tecer considerações acerca das limitações atuais da rede em termos de equipamento primário e secundário. Efetuado o reconhecimento da rede do CMSM, o próximo objetivo passa por modelar a rede através de *software* com o intuito de simular diversos

cenários de carga, topologias de exploração e verificar a hipótese da rede ser explorada com diferentes configurações. Procede-se igualmente à simulação da presença de uma unidade de geração própria na rede do CMSM, analisando-se para diferentes modos de exploração as alterações que a mesma provoca ao nível do trânsito de energia e das correntes de curto-circuito da instalação atual.

Tendo uma compreensão plena da instalação e dos requisitos de exploração da mesma, propõe-se a integração de um conjunto de automatismos que proporcionem uma lógica de automação ajustada às necessidades da rede, utilizando-se as Redes de Petri, a exemplo de outros trabalhos [3, 4], como ferramenta de modelação dos princípios de funcionamento dos automatismos propostos.

Por último, são efetuadas considerações acerca da implementação dos automatismos no SPCC da micro-rede, procurando-se definir uma arquitetura do sistema assente em normas internacionais. Neste âmbito, são tomadas em consideração as normas CEI 61131-3 e CEI 61850, relativas a linguagens normalizadas de programação de controladores lógicos e ao sistema de comunicação e transmissão de dados entre os diferentes dispositivos físicos de um SPCC, sendo estas atualmente utilizadas no âmbito da automação e digitalização de diversos tipos de redes de energia elétrica.

1.3 Organização da Dissertação

Após uma introdução com a apresentação sumária do enquadramento e dos objetivos propostos no âmbito do trabalho realizado, procede-se no **Capítulo 2** à descrição e caracterização da rede atual do CMSM, tendo por base o tratamento dos dados recolhidos na fase de reconhecimento da instalação. Posteriormente, é efetuada a modelação da rede em *Simulink*, utilizando-se o modelo criado para analisar o trânsito de energia, para diferentes cenários de carga e topologias de exploração, e para efetuar o cálculo das correntes de curto-circuito máximas nos diversos pontos da instalação.

No **Capítulo 3** realiza-se o estudo de integração de uma unidade de produção para auto-consumo (UPAC) na rede do CMSM, chegando-se à conclusão que uma central de biomassa é a solução mais vantajosa e que melhor se adequa à especificidade e às necessidades da instalação. Utilizando o modelo *Simulink* da rede previamente elaborado, procede-se novamente à análise do trânsito de energia e das correntes de curto-circuito, tendo agora em conta a influência da central na dinâmica de funcionamento da rede.

No **Capítulo 4**, começa-se por apresentar os condicionamentos de exploração e os requisitos de proteção a ter em consideração na micro-rede idealizada para o CMSM. De seguida, são descritos os automatismos propostos para a lógica de automação da micro-rede, sendo que um dos automatismos, associado ao processo de interligação da micro-rede com a RESP, é dimensionado neste trabalho especificamente para a rede em estudo. Por último, são propostas reestruturações na rede atual tendo em vista a implementação dos automatismos, apresentado-se soluções de automação com níveis crescentes de complexidade e investimento.

No **Capítulo 5**, os princípios operacionais definidos no Capítulo anterior para o automatismo dimensionado neste trabalho são especificados através de Redes de Petri, procedendo-se à validação do funcionamento lógico dos diversos módulos que compõem o automatismo, bem como da Rede de Petri do automatismo global.

No **Capítulo 6** apresenta-se a conclusão do trabalho e uma direção de desenvolvimentos futuros, tendo por base aspetos deste projeto que podem ser abordados com maior profundidade.

São ainda incluídos quatro anexos, os quais servem de complemento aos tópicos abordados e desenvolvidos em cada um dos Capítulos anteriormente mencionados.

Capítulo 2

Rede de Média Tensão do CMSM

Neste Capítulo procede-se à análise dos dados recolhidos durante a fase de reconhecimento da rede privada de distribuição em MT do Campo Militar de Santa Margarida (CMSM) e à especificação dos elementos que a constituem, como os Postos de Transformação (PT's) e respetivos transformadores, os ramais de MT e a rede elétrica de serviço público (RESP) de distribuição localizada a montante.

Com a caracterização da rede do CMSM, tem-se como objetivo a construção de um modelo matemático para simulação e avaliação do comportamento da instalação, ao nível do trânsito de energia (TE) e das correntes de curto-circuito, para diferentes cenários de carga e condições de exploração. Com essa finalidade, utiliza-se o *software* de modelação de sistemas *Simulink*, constando no Anexo B os respetivos blocos modeladores e ferramentas utilizadas na modelação e análise da rede.

O trabalho de análise e simulação comportamental da rede atual é determinante para o dimensionamento de uma micro-rede para o CMSM, quer na perspetiva de integração de unidades de geração própria na instalação, quer na definição das respetivas filosofias de proteção e de lógica de automação associadas ao seu Sistema de Proteção, Comando e Controlo (SPCC).

2.1 Reconhecimento da rede

O reconhecimento da rede é efetuado com base em visitas realizadas ao local entre os meses de Junho e Setembro de 2017. Através das informações recolhidas e do estudo da instalação efetuado durante as mesmas, procede-se à realização das seguintes tarefas:

- **Descrição da rede**, através da análise do seu esquema unifilar, identificando-se os elementos que a constituem, o modo de exploração atual e as limitações existentes em termos de equipamento primário e secundário;
- **Avaliação de consumos**, com o intuito de estimar o cenário de carga atual da instalação e, posteriormente, analisar o TE na rede de MT.

Em primeiro lugar, começa-se por apresentar na Figura 2.1 o esquema unifilar da rede de MT, a partir do qual se inicia a caracterização da rede.

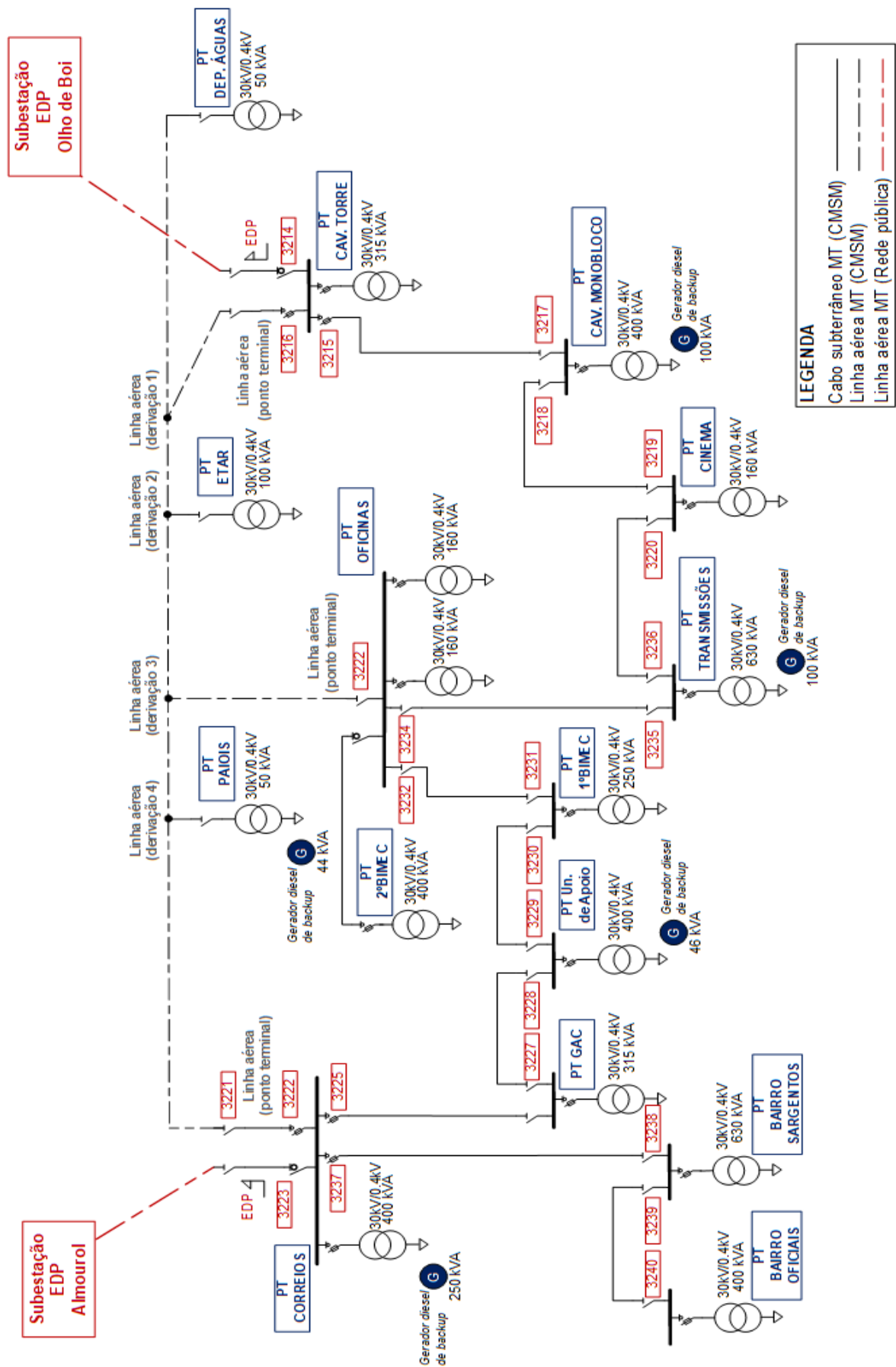


Figura 2.1: Esquema unifilar da Rede de Média Tensão do CMSM

2.1.1 Descrição da rede

Na Figura 2.1 encontram-se identificados os barramentos, os ramais de MT, os PT's e as potências e tensões nominais dos respetivos transformadores, assim como os equipamentos de corte e seccionamento, acompanhados na figura por um número identificador da cela de proteção. Em alguns pontos da rede são visíveis geradores, tratando-se de geradores diesel de *backup* dedicados a unidades ou cargas de caráter prioritário do CMSM. Pelo esquema unifilar, constata-se que se trata de uma rede de MT com tensão nominal de 30 kV, de topologia malhada e constituída por quinze PT's, contabilizando-se dezasseis transformadores de distribuição (MT/BT) com uma potência total instalada de 4820 kVA. A rede possui dois pontos de receção de alimentação proveniente da RESP de distribuição – o barramento PT Correios, que recebe energia proveniente da Subestação EDP Almourol, e o barramento PT Cavalaria Torre, alimentado pela Subestação EDP Olho de Boi, sendo este último o ponto de receção utilizado em condições normais de exploração da rede e servindo a entrada do PT Correios como alternativa.

Ramais

Relativamente aos ramais de MT que interligam os barramentos e garantem a distribuição de energia pelos diversos PT's, são maioritariamente cabos subterrâneos, existindo alguns troços em linha aérea que percorrem o CMSM em praticamente todo o seu comprimento. Através de uma planta da instalação facultada pelo Departamento de Infraestruturas do Exército (DIE), obtêm-se os comprimentos dos diversos ramais de MT da rede, sendo que neste documento não se apresenta qualquer planta do CMSM, uma vez que não existe permissão do DIE para que sejam publicadas imagens ou esquemas reais do interior do campo militar. No total, encontram-se instalados cerca de 3,2 km em linha aérea e de 5,4 km em cabo subterrâneo, apresentando-se na Tabela 2.1 os comprimentos dos diversos ramais.

Tabela 2.1: Ramais existentes na rede de MT do CMSM

Ponto de partida	Ponto de chegada	Tipo de ligação	Tensão nominal (kV)	Comprimento (m)
PT Cavalaria Torre	Linha aérea - derivação (1)	Linha aérea	30	134
PT Cavalaria Torre	PT Cavalaria Monobloco	Cabo subterrâneo	30	590
Linha aérea - derivação (1)	PT Dep. de Águas	Linha aérea	30	563
Linha aérea - derivação (1)	Linha aérea - derivação (2)	Linha aérea	30	863
Linha aérea - derivação (2)	PT ETAR	Linha aérea	30	-
Linha aérea - derivação (2)	Linha aérea - derivação (3)	Linha aérea	30	82
Linha aérea - derivação (3)	PT Oficinas	Linha aérea	30	255
Linha aérea - derivação (3)	Linha aérea - derivação (4)	Linha aérea	30	416
PT Oficinas	PT 1ªBIMEC	Cabo subterrâneo	30	570
PT Oficinas	PT 2ªBIMEC	Cabo subterrâneo	30	152
PT Oficinas	PT Transmissões	Cabo subterrâneo	30	490
Linha aérea - derivação (4)	PT Paiois	Linha aérea	30	-
Linha aérea - derivação (4)	PT Correios	Linha aérea	30	885
PT Correios	PT Bairro Sargentos	Cabo subterrâneo	30	393
PT Correios	PT GAC	Cabo subterrâneo	30	420
PT Bairro Sargentos	PT Bairro Oficiais	Cabo subterrâneo	30	845
PT GAC	PT Unidade de Apoio	Cabo subterrâneo	30	200
PT Unidade de Apoio	PT 1ªBIMEC	Cabo subterrâneo	30	595
PT Transmissões	PT Cinema	Cabo subterrâneo	30	772
PT Cinema	PT Cavalaria Monobloco	Cabo subterrâneo	30	350

Geradores de *backup*

Os geradores diesel de *backup* têm a função de salvaguardar eventuais falhas de energia da RESP que possam comprometer a continuidade de operações associadas a cargas de missão crítica do CMSM. Os geradores atuam somente para manter a continuidade no fornecimento de energia às unidades do CMSM a que estão dedicados e entram em serviço apenas quando falha a alimentação dos PT's das respectivas unidades, injetando potência diretamente à entrada dos Quadros Gerais de Baixa Tensão (QGBT). Isto é conseguido através de um *bypass* na alimentação que, falhando a alimentação do PT, desconecta as ligações provenientes do secundário do transformador e estabelece a ligação do gerador ao QGBT, passando a rede de BT a jusante do PT a estar isolada da restante instalação. A potência fornecida pelos geradores nunca flui no sentido da MT e, sendo assim, estes não têm influência no TE ao nível da MT. Uma vez que neste trabalho não existe o interesse em especificar a rede de BT a jusante de cada PT, nem em simular o sistema atual de alimentação de *backup* do CMSM, aliado ao facto de a posterior análise do TE (ver secção 2.3) ser essencialmente ao nível dos ramais e barramentos de MT da rede, os geradores de *backup* são elementos excluídos na modelação da rede.

Topologia de exploração e redundâncias

Tal como referido no início desta secção, a rede de MT apresenta uma configuração malhada, sendo visível a possibilidade de formar dois anéis fechados. No entanto, à semelhança da generalidade da rede de distribuição em Portugal, é explorada radialmente, possuindo ramais normalmente isolados que impedem a formação de malhas fechadas. Na Figura 2.2 consta o esquema unifilar representativo da topologia atual de exploração da rede, aqui designada como Topologia I. Nesta topologia, os ramais *PT Un. de Apoio - PT 1ªBIMEC* e *PT Cav. Torre - PT Cav. Monobloco* encontram-se isolados.

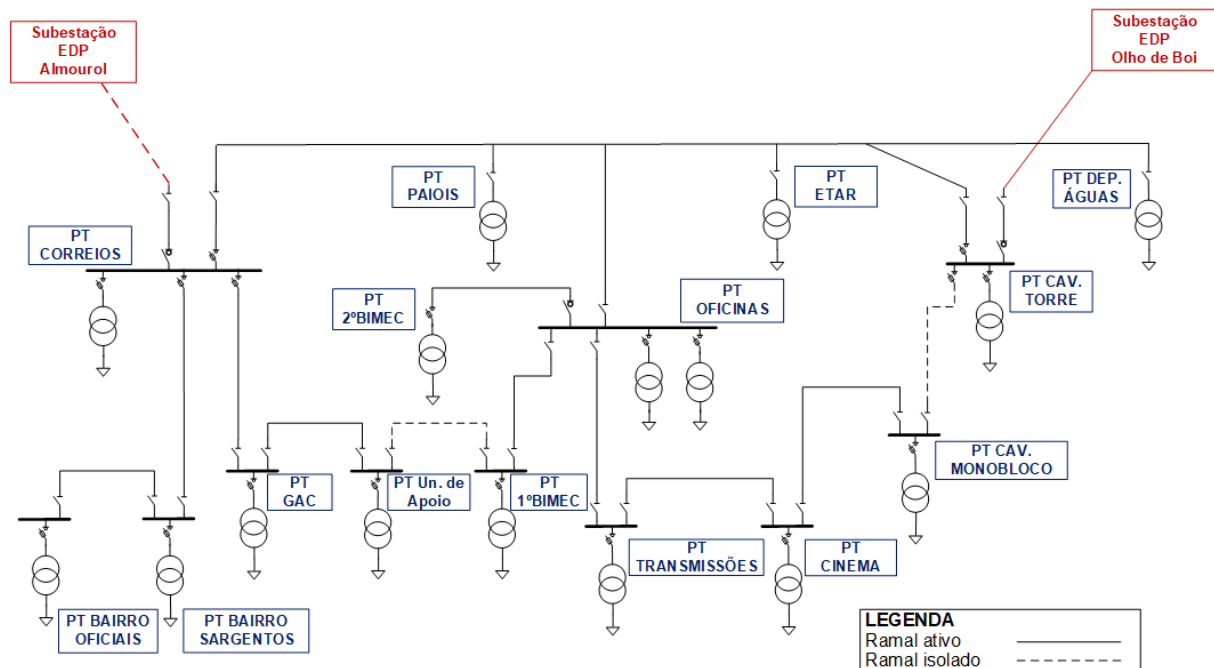


Figura 2.2: Esquema unifilar da topologia atual de exploração (Topologia I)

Relativamente a redundâncias existentes na rede, verifica-se que grande parte dos barramentos de MT possui mais que um caminho possível de alimentação, o que permite manter em serviço a totalidade dos PT's da instalação utilizando diferentes topologias de exploração. Além disso, o facto de a rede possuir dois pontos de receção da RESP, nunca ativos em simultâneo, garante sempre uma fonte de reserva de alimentação da instalação a partir da RESP. De notar que o PT Oficinas possui dois transformadores de potência e ambos têm capacidade de suportar a totalidade da carga desta unidade, encontrando-se normalmente apenas um deles em serviço. Estas redundâncias na alimentação reforçam a segurança no fornecimento de energia elétrica às diversas unidades e devem ser tidas em conta numa lógica de automação a implementar na rede de MT, uma vez que possibilitam a idealização de um automatismo de operação de recurso que intervenha automaticamente na reconfiguração topológica da rede e seja capaz de garantir a realimentação de um barramento a partir de uma fonte alternativa.

Proteções e encravamentos

A filosofia de proteções da rede atual de MT do CMSM revela uma solução simples e tecnologicamente antiquada, uma vez que os sistemas de proteção são atualmente baseados em proteções digitais e equipamentos de corte comandáveis, como disjuntores. Neste caso, a proteção da rede de MT é efetuada com recurso a equipamentos de corte e seccionamento não comandáveis - interruptor-fusíveis e seccionadores, não existindo quaisquer celas de proteção com relés eletromecânicos, eletrónicos analógicos ou de última geração - digitais. Em termos de equipamentos de medição de correntes (TI's - Transformadores de Intensidade) e de tensões (TT's - Transformadores de Tensão), apenas existem nos pontos de receção da RESP e têm aplicação na contagem da energia consumida na instalação. Atendendo à ausência dos equipamentos de medida e proteção referidos, constata-se desde já as limitações da rede atual e a impossibilidade de implementação de um sistema de automação.

Na rede atual encontra-se implementado um conjunto de encravamentos mecânicos que tem como principal finalidade garantir que o descomissionamento da linha aérea interna do CMSM é efetuado de forma segura. Os encravamentos existentes são realizados através de um sistema de chaves que implica que os equipamentos de corte/seccionamento de certas celas só possam ser manobrados com a chave de outra(s) cela(s), tratando-se de uma metodologia de encravamento antiga e que implica alterações físicas na rede, contrariamente ao que sucede em redes modernas, nas quais a lógica de encravamentos é implementável por software. Nos próximos pontos identificam-se instruções de manobra da rede, onde são referidas as condições normais de exploração e os encravamentos existentes:

- A alimentação principal do anel de MT do CMSM é feita através do PT Cavalaria Torre, servindo a entrada do PT Correios como alternativa;
- Os ramais *PT Unidade de Apoio – PT 1ªBIMEC* e *PT Cav. Torre – PT Cav. Monobloco* possuem os seccionadores aos seus terminais normalmente abertos. Na topologia atual de exploração (ver Figura 2.2), são estes dois ramais que se encontram normalmente isolados;
- Encravamento entre o seccionador de terra da *Cela 3215 do PT Cav. Torre* e o seccionador da *Cela*

3217 do PT Cav. Monobloco: o primeiro só é manobrável se o segundo estiver aberto;

- Encravamento entre o seccionador de terra da *Cela 3216 do PT Cav. Torre*, o seccionador da *Cela 3222 do PT Correios* e o seccionador da *Cela 3233 do PT Oficinas*: o primeiro só é manobrável se o segundo e o terceiro estiverem abertos. Esta sequência de manobras é utilizada para colocar a linha aérea fora de serviço.

2.1.2 Avaliação de consumos

Conforme descrito nos próximos pontos, a avaliação de consumos da instalação do CMSM é realizada através da observação do histórico de pontas da instalação, da análise de faturas de eletricidade e do registo de diagramas de carga.

Histórico de pontas

Nos pontos de receção da RESP é efetuada, para efeitos de faturação, a contagem da energia através de um contador digital com capacidade de guardar em memória as potências máximas registadas na instalação e o respetivo dia em que ocorreram. Através da observação do histórico de pontas, tem-se uma noção de como variam os consumos totais ao longo do ano, tendo-se visualizado no contador doze valores de pontas, registados entre Outubro de 2016 e Setembro de 2017, o que corresponde a um histórico de um ano. No entanto, apesar de existirem doze registos de potências máximas, estas não são relativas a cada mês, sendo que para alguns meses existem dois valores registados e outros meses não possuem qualquer registo, como se pode verificar pelo gráfico da Figura 2.3.

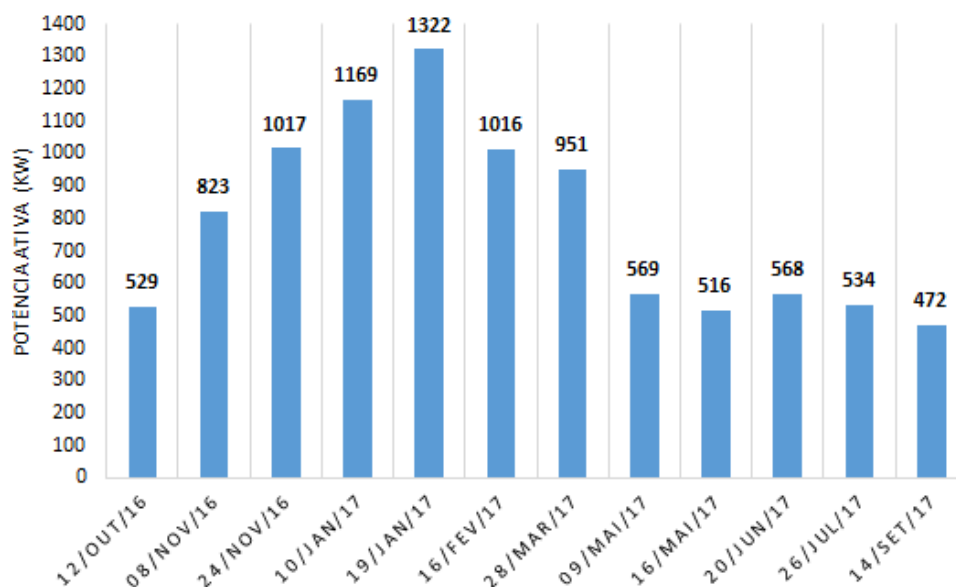


Figura 2.3: Histórico de pontas de carga da instalação

As pontas registadas revelam as diferenças que existem ao nível dos consumos durante os meses de Inverno e os restantes meses do ano: a ponta máxima (Janeiro - 1322 kW) corresponde a mais do

dobro das pontas registadas entre Maio e Outubro, constatando-se que a carga em meses de Verão é ligeiramente superior a 1/3 da ponta máxima. Apesar de existirem outras variáveis que poderão influenciar este aumento significativo, o fator principal corresponderá à utilização com maior frequência de equipamentos de climatização para aquecimento durante o Inverno. Tendo em conta a relação entre as potências requeridas neste período do ano e nos meses de Verão, pode-se assumir de forma aproximada que 2/3 dos consumos no Inverno são em aquecimento.

Faturas de eletricidade

A análise das faturas de eletricidade do CMSM tem como principal finalidade tirar conclusões acerca da natureza da carga da instalação. Através das faturas são obtidos, para os respetivos períodos de faturação, os valores faturados de energia ativa, energia reativa indutiva (fornecida pela RESP) e energia reativa capacitiva (injetada na RESP), sendo possível com estes dados estimar o fator de potência médio das cargas da instalação. Antes de se proceder à análise das faturas, é necessário entender como se processa atualmente a faturação de energia para consumidores em MT, como o CMSM. Para consumidores de MAT, AT e MT aplica-se uma tarifa tetra horária [5], associada a quatro períodos distintos do dia: *Ponta*, *Cheias*, *Vazio Normal* e *Supervazio*, sendo a energia ativa naturalmente mais cara durante horas de Ponta e mais barata em horas de *Vazio*.

No que respeita à energia reativa faturada, a análise dos seus valores é importante para a estimação do fator de potência médio das cargas da instalação. A legislação atual no que respeita à faturação de energia reativa [6], define que a energia reativa indutiva consumida fora de horas de vazio é faturada para valores de $\tan \phi$ superiores a 0,3, verificando-se a existência de três escalões de faturação distintos (Escala 1: $0,3 < \tan \phi < 0,4$; Escala 2: $0,4 < \tan \phi < 0,5$; Escala 3: $\tan \phi \geq 0,5$). O valor de $\tan \phi$ define-se pelo quociente entre a energia reativa e a energia ativa medidas no mesmo período. Já a energia reativa capacitiva, injetada na rede distribuidora, é faturada na totalidade nas horas de vazio.

Relativamente às faturas de eletricidade, teve-se acesso a uma amostra de cinco, referentes a períodos de faturação entre os anos de 2014 e 2017. Apesar do número de faturas para análise ser reduzido, o facto de serem referentes a anos e períodos distintos do ano, permite ter uma noção de como variaram anualmente os consumos da instalação. Os dados das faturas obtidas constam na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Dados das faturas de eletricidade

Ano	Ponto de entrega	Período de faturação	Potência contratada	Energia Ativa (kWh)	Energia Reativa	
					Indutiva (kvarh)	Capacitiva (kvarh)
2014	PT Cav. Torre	16/06 - 15/07	2241,3 kW	218 340	0	11 848
2014	PT Cav. Torre	16/10 - 15/11	2241,3 kW	291 163	0	24 071
2015	PT Cav. Torre	16/06 - 15/07	2241,3 kW	207 610	0	12 296
2016	PT Cav. Torre	16/10 - 15/11	2241,3 kW	254 919	0	17 762
2017	PT Cav. Torre	16/01 - 15/02	2241,3 kW	565 779	0	16 380

Pelos dados das faturas, conclui-se que a potência contratada é de 2241,3 kW, valor contratual que não sofreu alterações nos últimos três anos e uma potência que esteve longe de ser atingida nos últimos

doze meses, atendendo ao histórico de pontas de carga da instalação (Figura 2.3). No que respeita aos consumos de energia ativa retratados nos dados das faturas, tecem-se as seguintes observações:

- No ano de 2014, verifica-se um aumento da energia consumida em cerca de 33% de Junho/Julho para Outubro/Novembro. No entanto, uma vez que ainda se tratam de meses de Outono, é previsível que o aumento seja relativamente superior no período de Inverno;
- No ano de 2015, para o qual apenas se tem a fatura de Junho/Julho, pode-se constatar que o nível de consumos é semelhante ao registado no mesmo período do ano anterior;
- Para o ano de 2016, observando a fatura de Outubro/Novembro, verifica-se que o consumo desceu ligeiramente face ao mesmo período de 2014, podendo este decréscimo dever-se a diferentes fatores (redução do nº de pessoas, menor utilização dos equipamentos de ar condicionado, etc.);
- Relativamente ao ano de 2017, possui-se a fatura de Janeiro/Fevereiro, período do ano onde normalmente se atinge o pico do Inverno. Não se obtiveram dados de faturas referentes a este período para anos anteriores, mas constata-se que o consumo é significativamente superior ao verificado nos meses de Outubro/Novembro em 2014 e 2016, aumentando em cerca de 95% e 120%, respetivamente. Este crescimento pode dever-se a diversas variáveis, mas certamente que a razão principal estará relacionada com a maior utilização de equipamentos para aquecimento.

Relativamente à energia reativa indutiva, é imediatamente notório que em nenhuma das faturas ocorre faturação da mesma. Tendo em conta que as faturas são referentes a anos e períodos distintos do ano, conclui-se que o facto dos valores faturados de energia reativa indutiva serem nulos é uma característica da instalação, independentemente da altura do ano. Desta forma, constata-se de imediato que o valor de $\tan \phi$ médio da instalação total é necessariamente inferior a 0,3, o que se traduz num fator de potência médio superior a 0,958 indutivos (ind.). Verifica-se ainda que existe faturação de energia reativa capacitiva, ou seja, em horas de vazio a rede do CMSM produz e injeta energia reativa na RESP, significando que a instalação neste período possui um fator de potência médio capacitivo.

O facto de o fator de potência médio ser necessariamente superior a 0,958 ind., numa instalação onde existem equipamentos consumidores de energia reativa, como transformadores, e onde não existe qualquer solução para correção do fator de potência, aliado ao facto de em horas de vazio a rede do CMSM injetar potência reativa na RESP, sugere a hipótese de existir produção de potência reativa nos ramais de MT do CMSM. Na secção 2.3, referente à análise do TE na rede de MT, será analisado o comportamento da rede relativamente aos aspetos mencionados nesta secção e, com base nessa análise, estimar-se-á o fator de potência médio das cargas do CMSM.

Diagramas de carga

De forma a avaliar o padrão de consumos característico do CMSM, recorreu-se à utilização de analisadores de potência (*Power Loggers*) com o objetivo de traçar diagramas de carga diários e estimar

o cenário crítico de consumos atual, não só da instalação geral, mas individualmente de cada PT. Os *Power Loggers* [7], fornecidos pelo Laboratório de Energia do Instituto Superior Técnico, foram instalados no lado de BT dos PT's, imediatamente a montante dos respetivos QGBT's, durante cerca de 24 horas. Uma vez que existem quinze postos de transformação na rede de distribuição do CMSM e a estadia para registo de diagramas de carga foi de cinco dias (18 - 22 de Setembro, 2017), foi necessário fazer uma seleção criteriosa dos pontos da rede onde se instalariam os equipamentos. Com base em informações previamente recolhidas acerca dos consumos da instalação, teve-se conhecimento das unidades que normalmente apresentam consumos mais elevados e, a partir daí, procedeu-se à seleção dos PT's onde seriam traçados diagramas de carga, tendo-se estabelecido a escala de medições definida na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Escala de medições para o registo de diagramas de carga

Posto de Transformação	Período de registo	
	Início	Fim
PT Cavalaria Monobloco	18/09 - 11:30	19/09 - 10:00
PT GAC	19/09 - 11:45	20/09 - 10:45
PT 1ªBIMEC	20/09 - 12:15	21/09 - 11:15
PT Correios	20/09 - 12:30	21/09 - 11:30
PT Unidade de Apoio	21/09 - 12:15	22/09 - 10:45
PT Transmissões	21/09 - 12:45	22/09 - 11:15

Nas Figuras A.1 a A.6, presentes no Anexo A, apresentam-se os diagramas de carga obtidos para cada um dos PT's selecionados para registo de medições, através dos quais se visualiza a variação de consumos ao longo do dia e se obtêm as potências máximas diárias registadas nos PT's durante os períodos de medição. No entanto, na análise do TE pretende-se considerar o cenário de maior exigência, para o qual se verificarão as cargas máximas da instalação e, sendo os diagramas de carga referentes a dias de Setembro, o mês que de acordo com o histórico de pontas (ver Figura 2.3) apresenta a potência máxima mensal mais baixa (472 kW), não é possível estimar diretamente a partir dos seus valores o cenário de carga mais crítico.

Tal como mencionado anteriormente, Janeiro é o mês com a ponta anual mais elevada e com o nível de consumos superior. Tendo-se igualmente conhecimento da ponta de Setembro, torna-se possível fazer uma extrapolação dos valores obtidos neste mês para Janeiro. Na Figura 2.4 apresenta-se a relação entre as pontas de consumo dos meses mencionados.

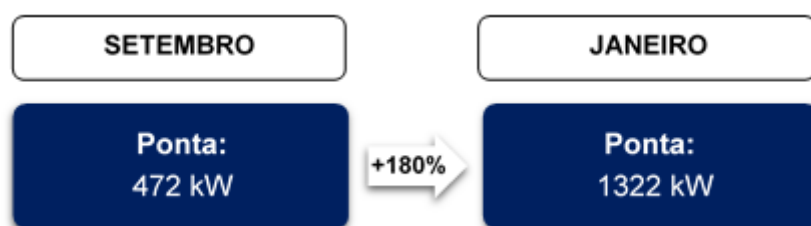


Figura 2.4: Relação entre as pontas de Setembro e Janeiro

Sabendo que a ponta de Janeiro aumenta em cerca de 180% face à ponta de Setembro e assumindo que a variação de consumos de mês para mês é próxima de ser linear, tanto para a instalação geral, como para cada um dos PT's do CMSM, estimam-se as potências máximas de Janeiro através da extrapolação dos valores obtidos pelos diagramas de carga registados, tendo por base o aumento relativo verificado entres as pontas destes dois meses. Os valores estimados constam na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Estimação das potências máximas de Janeiro

Unidade	Setembro	Janeiro
	Ponta (kW)	Ponta (kW)
Instalação geral	472	1322
PT Cavalaria Monobloco	87	241
PT GAC	36	100
PT 1ªBIMEC	74	206
PT Correios	43	120
PT Unidade de Apoio	67	189
PT Transmissões	37	104

A potência máxima estimada para a totalidade dos restantes PT's existentes na instalação, na qual estão implícitas as perdas de potência por efeito de Joule nos ramais de MT, é dada pela diferença entre a ponta total da instalação e a soma das potências máximas estimadas para os PT's alvo de registo de medições, obtendo-se um valor de 362 kW. Com base neste valor, torna-se possível estimar a ponta máxima para os restantes PT's, distribuindo os 362 kW pelas unidades em falta, não de forma equitativa, mas tendo em conta a relação entre a potência nominal destes PT's e a potência total instalada no CMSM.

Outro aspeto a ter em conta relativamente aos consumos da instalação, reside no facto de atualmente as unidades associadas aos PT's Cinema e 2ªBIMEC apresentarem uma escassa utilização e, consequentemente, uma contribuição praticamente nula em termos de consumos. Na secção 2.3, aquando da definição dos cenários de carga a ter em conta para a simulação do TE na rede, são definidas as cargas dos restantes PT's, tendo por base a análise efetuada nesta secção.

2.2 Elementos da rede

Nesta secção procede-se à caracterização dos diversos elementos da rede de MT do CMSM e ao cálculo dos respetivos parâmetros que são exigidos na modelação em *Simulink*. No Anexo B apresentam-se os blocos modeladores utilizados para especificar cada um dos elementos, bem como o modelo completo elaborado para a rede atual do CMSM (ver Figura B.15). De notar que as informações recolhidas durante a fase de reconhecimento não são suficientes para caracterizar tecnicamente a totalidade da instalação. Para colmatar este aspeto, recorre-se a normas e a documentação técnica na caracterização dos elementos em que os dados facultados são escassos.

2.2.1 Transformadores

Tal como mencionado na secção 2.1.1, existem quinze PT's na rede do CMSM e totalizam-se dezasseis transformadores MT/BT instalados. Tratam-se de PT's de cabine baixa, à exceção dos três PT's ligados diretamente à linha aérea interna (PT's aéreos - Paiois, ETAR e Dep. de Águas). Através de informações fornecidas pelo DIE, tomou-se conhecimento das potências nominais dos transformadores da instalação. No entanto, dados relevantes para a modelação dos mesmos, como a tensão de curto-circuito (u_{cc}) e as perdas em curto-circuito (P_{cc}) e em vazio (P_0), não são conhecidos, recorrendo-se à norma EN 50464-1 [8] para a obtenção de valores típicos destas grandezas. Na Tabela 2.5 constam os parâmetros assumidos para os transformadores existentes na rede.

Tabela 2.5: Parâmetros dos transformadores (1)

Posto de Transformação	Potência nominal (kVA)	Tensões nominais (kV)	Tensão de curto-circuito (%)	Perdas em curto-circuito (W)	Perdas em vazio (W)
PT Cavalaria Torre	315	30/0,4	5	3900	520
PT Correios	400	30/0,4	5,0	4600	610
PT Bairro de Oficiais	400	30/0,4	4,2	4600	610
PT Bairro de Sargentos	630	30/0,4	5,3	6500	860
PT GAC	315	30/0,4	4,0	3900	520
PT Unidade de Apoio	400	30/0,4	5,2	4600	610
PT Paiois	50	30/0,4	4,0	1100	125
PT 1ªBIMEC	250	30/0,4	5,1	3250	425
PT 2ªBIMEC	400	30/0,4	4,0	4600	610
PT ETAR	100	30/0,4	4,0	1750	210
PT Oficinas	160	30/0,4	4,4	2350	300
	160	30/0,4	4,4	2350	300
PT Transmissões	630	30/0,4	4,0	6500	860
PT Cavalaria Monobloco	400	30/0,4	5,3	4600	610
PT Cinema	160	30/0,4	5,0	2350	300
PT Depósito de Água	50	30/0,4	4,0	1100	125

A especificação dos transformadores é efetuada de acordo com o modelo de transformador associado ao bloco modelador deste elemento em *Simulink* (ver Anexo B.1.1). Na Figura 2.5, encontra-se o esquema equivalente monofásico considerado pelo *Simulink* na modelação do transformador.

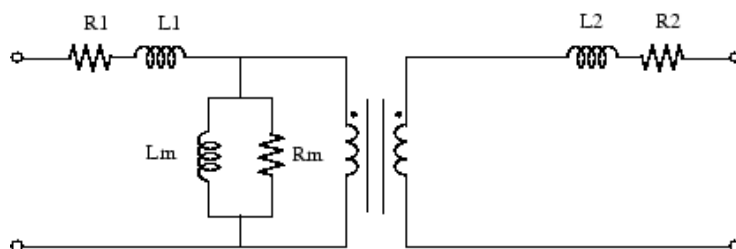


Figura 2.5: Esquema monofásico equivalente do transformador no *Simulink* [9]

Visualiza-se que as impedâncias dos enrolamentos primário e secundário são especificadas individualmente através das respetivas resistências (R_1 e R_2) e indutâncias (L_1 e L_2). O ramo de magnetização do transformador é tratado como uma impedância, sendo caracterizado por uma indutância (L_m) em

paralelo com uma resistência (R_m). Com base nas equações que se seguem e nos dados apresentados na Tabela 2.5, procede-se ao cálculo dos parâmetros de cada transformador, em p.u. na base das respectivas potências nominais, que servem de *inputs* ao modelo utilizado.

$$Z_T(p.u.) = \frac{u_{cc}(\%)^2}{100}, \quad (2.1a)$$

$$R_T(p.u.) = \frac{P_{cc}(W)/S_{nT}(VA)}{I_n^2(p.u.)} = P_{cc}(p.u.), \quad (2.1b)$$

$$X_T(p.u.) = \sqrt{Z_T^2(p.u.) - R_T^2(p.u.)}. \quad (2.1c)$$

Através das equações 2.1a, 2.1b e 2.1c, calcula-se a impedância de curto-circuito do transformador. As resistências e reatâncias de cada enrolamento são aproximadamente metade da resistência (R_T) e reatância (X_T) de curto-circuito [10]:

$$R_1(p.u.) \approx R_2(p.u.) \approx \frac{R_T(p.u.)}{2}, \quad (2.2a)$$

$$X_1(p.u.) \approx X_2(p.u.) \approx \frac{X_T(p.u.)}{2}. \quad (2.2b)$$

Para o cálculo dos parâmetros do ramo de magnetização, requer-se o conhecimento da corrente de magnetização (I_m). Sendo o seu valor desconhecido, assume-se para todos os transformadores um valor de I_m igual a 1% da corrente nominal (tipicamente entre 0,6% e 8% [10]).

$$R_m(p.u.) = \frac{U_n^2(p.u.)}{P_0(W)/S_{nT}(VA)} = \frac{1}{P_0(p.u.)}, \quad (2.3a)$$

$$X_m(p.u.) = \sqrt{\left(\frac{U_n(p.u.)}{I_m(p.u.)}\right)^2 - R_m^2(p.u.)}. \quad (2.3b)$$

Na Tabela 2.6 encontram-se os parâmetros calculados pelos conjuntos de equações 2.1 a 2.3.

Tabela 2.6: Parâmetros dos transformadores (2)

Posto de Transformação	Potência nominal (kVA)	Tensões nominais (kV)	Z_T (p.u.)	R_T (p.u.)	X_T (p.u.)	R_1, R_2 (p.u.)	X_1, X_2 (p.u.)	R_m (p.u.)	X_m (p.u.)
PT Cavalaria Torre	315	30/0,4	0,0500	0,0124	0,0484	0,0062	0,0242	605,8	101,4
PT Correios	400	30/0,4	0,0500	0,0115	0,0487	0,0058	0,0244	655,7	101,2
PT Bairro de Oficiais	400	30/0,4	0,0420	0,0115	0,0404	0,0058	0,0202	655,7	101,2
PT Bairro de Sargentos	630	30/0,4	0,0530	0,0103	0,0520	0,0052	0,0260	732,6	100,9
PT GAC	315	30/0,4	0,0400	0,0124	0,0380	0,0062	0,0190	605,8	101,4
PT Unidade de Apoio	400	30/0,4	0,0520	0,0115	0,0507	0,0058	0,0254	655,7	101,2
PT Paiois	50	30/0,4	0,0400	0,0224	0,0334	0,0112	0,0167	400,0	103,3
PT 1ªBIMEC	250	30/0,4	0,0510	0,0130	0,0493	0,0065	0,0297	588,2	101,5
PT 2ªBIMEC	400	30/0,4	0,0400	0,0115	0,0383	0,0058	0,0192	655,7	101,2
PT ETAR	100	30/0,4	0,0400	0,0175	0,0360	0,0088	0,0180	476,2	102,3
PT Oficinas	160	30/0,4	0,0440	0,0147	0,0415	0,0074	0,0208	533,3	101,8
	160	30/0,4	0,0440	0,0147	0,0415	0,0074	0,0208	533,3	101,8
PT Transmissões	630	30/0,4	0,0400	0,0103	0,0386	0,0052	0,0193	732,6	100,9
PT Cavalaria Monobloco	400	30/0,4	0,0530	0,0115	0,0517	0,0058	0,0259	655,7	101,2
PT Cinema	160	30/0,4	0,0500	0,0147	0,0478	0,0074	0,0239	533,3	101,8
PT Depósito de Água	50	30/0,4	0,0400	0,0220	0,0334	0,0110	0,0167	400,0	103,2

De notar que na Tabela 2.6, ao invés de constarem os valores das indutâncias requeridas em *Simulink*, têm-se os valores das reatâncias associadas. Contudo, o valor de ambas as grandezas é igual em p.u.

2.2.2 Cabos subterrâneos

Relativamente à rede subterrânea de MT do CMSM, tem-se apenas conhecimento do tipo de cabos monopulares utilizados na ligação entre o PT Cav. Torre e o PT Cav. Monobloco, tendo como referência "3x(1x120 mm²) LXHIOZ1(be)". Consultando fichas técnicas de um fabricante de cabos [11], retiram-se as suas características construtivas, dimensionais e elétricas. Trata-se de um cabo monopolar com alma condutora em alumínio, isolamento de polietileno reticulado (XLPE) e um écran condutor sobre a camada isolante de cobre com secção de 16 mm², sendo um tipo de cabo homologado pela EDP. Nas Tabelas 2.7 e 2.8 constam os parâmetros do cabo mais relevantes para o estudo, sendo que os valores apresentados para as grandezas elétricas são referentes a uma instalação trifásica dos cabos em trevo juntivo. De modo a uniformizar a instalação, assume-se que os restantes ramais subterrâneos são compostos pelo mesmo tipo de cabo.

Tabela 2.7: Parâmetros do cabo monopolar LXHIOZ1 (1)

Designação técnica	Tensão nominal (kV)	Tensão máxima entre fases (kV)	Secção (mm ²)	Diâmetro exterior (mm)	Secção écran (mm ²)
LXHIOZ1(be)	18/30	36	120	38	16

Tabela 2.8: Parâmetros do cabo monopolar LXHIOZ1 (2)

R _{DC} @ 20°C (Ω/km)	R _{AC} @ 90°C (Ω/km)	L (mH/km)	X _L (Ω/km)	C _{fase-terra} (μF/km)	I _{máx} (A)	I _{máx} admissível em c.c. na alma (1s) (A)	I _{máx} admissível em c.c. no écran (1s) (A)
0,253	0,325	0,411	0,129	0,182	235	11200	2900

A corrente máxima admissível pelo condutor está relacionada com o seu limite térmico. Com base no seu valor, a capacidade de transporte de um trio de cabos monopulares deste tipo é de 12,2 MVA à tensão nominal, dado a ter em conta aquando da análise do Trânsito de Energia na secção 2.3.

O modelo utilizado na especificação dos cabos em *Simulink* (ver Anexo B.1.2) requer as componentes simétricas da impedância e da capacitância. A decomposição em sistema direto, inverso e homopolar é imprescindível para o cálculo de curto-circuitos assimétricos, um estudo fora do âmbito deste trabalho, sendo no entanto necessário proceder ao cálculo das componentes simétricas para a modelação dos cabos em *Simulink*. Os valores presentes na Tabela 2.8 dizem respeito às sequências diretas da impedância e da capacitância. Tendo em conta que tanto cabos, como linhas, são elementos passivos, a componente inversa é igual à direta, sendo necessário determinar a componente homopolar destas grandezas, a qual está dependente do meio envolvente da canalização, das características do solo, massas metálicas nas proximidades, etc. Com recurso a um guia técnico de um fabricante conceituado de condutores elétricos [12], obtêm-se métodos de cálculo, baseados em hipóteses simplificativas,

para a impedância homopolar do conjunto de cabos. Para um trio de cabos monopolares e assumindo que o retorno da corrente homopolar se efetua simultaneamente pelo solo e pelos écrans ligados à terra em ambas as extremidades do cabo, utilizam-se as seguintes equações no cálculo da impedância homopolar (Z_0).

$$\overline{Z}_0 = \overline{Z}_A - \frac{\overline{Z}_M^2}{\overline{Z}_E} \quad (\Omega/km), \quad (2.4a)$$

$$\overline{Z}_A = R + 3R_S + j4\pi f \times \ln \left(\frac{2h_s^3}{0,779d \times a_m^2} \right) \times 10^{-4} \quad (\Omega/km), \quad (2.4b)$$

$$\overline{Z}_E = R_E + 3R_S + j4\pi f \times \ln \left(\frac{2h_s^3}{d_m \times a_m^2} \right) \times 10^{-4} \quad (\Omega/km), \quad (2.4c)$$

$$\overline{Z}_M = 3R_S + j4\pi f \times \ln \left(\frac{2h_s^3}{d_m \times a_m^2} \right) \times 10^{-4} \quad (\Omega/km). \quad (2.4d)$$

As notações utilizadas nas equações 2.4a a 2.4d, bem como o valor dos respetivos parâmetros para o cabo em questão, encontram-se de seguida detalhados:

- R - resistência do condutor à temperatura de serviço (Ω/km), sendo retirado diretamente da Tabela 2.8 o seu valor para a temperatura máxima ($90^\circ C$) admissível pelo isolamento do cabo em regime permanente $\rightarrow R = 0,325 \Omega/km$;
- R_E - resistência do écran à temperatura de serviço (Ω/km). Depende da secção e da resistividade ($\rho_{20^\circ C}$) do material e calcula-se por $R_{20^\circ C} = \frac{\rho_{20^\circ C}}{S} \quad (\Omega/km)$. Para obter a resistência para outras temperaturas, aplica-se a equação $R_\Theta = R_{20^\circ C}[1 + \alpha_{20^\circ C}(\Theta - 20)]$, em que $\alpha_{20^\circ C}$ é o coeficiente de variação da resistividade. (Cobre: $\rho_{20^\circ C} \approx 17,2 \Omega \cdot mm^2/km$ e $\alpha_{20^\circ C} \approx 3,93 \times 10^{-3} \text{ }^\circ C^{-1}$) $\rightarrow R_E = 1,403 \Omega/km$;
- d - diâmetro da alma condutora (mm), obtido pela sua secção $\rightarrow d = 12,4 \text{ mm}$;
- d_m - diâmetro geométrico do écran (mm), obtido pela sua secção $\rightarrow d_m = 4,5 \text{ mm}$;
- a_m - distância geométrica entre o centro dos condutores (mm). Em trevo juntivo os cabos estão encostados, ditando que o valor desta distância seja praticamente igual ao diâmetro exterior de um cabo $\rightarrow a_m = 38,3 \text{ mm}$;
- R_S - resistência do solo em corrente alternada, assumindo-se $R_S = \pi \cdot f \cdot 10^{-4} \Omega/km$;
- h_s - profundidade equivalente de retorno pelo solo, dada aproximadamente por $659 \sqrt{\frac{\rho_s}{f}} \cdot 10^3$, onde ρ_s é a resistividade elétrica do solo ($\rho_s \approx 100 \Omega \cdot m$, para um solo normal de uma zona temperada).

Relativamente à capacitância, num trio de cabos monopolares, tendo cada um isolamento individual, não existe acoplamento capacitivo entre os três condutores/fases [13]. O acoplamento capacitivo existente está associado à capacitância fase-terra (neste caso, entre a alma condutora e o écran que liga à terra), assumindo-se o seu valor, tanto para a sequência direta, como para a homopolar, uma vez que a capacitância fase-fase é nula. De notar que, por norma, a componente capacitiva de cabos/linhas é

desprezada no cálculo de curto-circuitos, aqui tida em atenção devido ao facto de ser um dos *inputs* requeridos pelo modelo de linhas/cabos em *Simulink*.

Com base no método de cálculo descrito no conjunto de fórmulas 2.4 e nos aspetos referidos no parágrafo anterior, obtêm-se os valores da componente homopolar da impedância e da capacitância por unidade de comprimento para um trio de cabos dispostos em trevo juntivo. Na Tabela 2.9 constam os valores das componentes direta e homopolar destas grandezas.

Tabela 2.9: Componentes simétricas da impedância e capacitância dos cabos

Resistência (Ω/km)		Indutância (mH/km)		Reatância indutiva (Ω/km)		Capacitância (F/km)	
Direta	Homopolar	Direta	Homopolar	Direta	Homopolar	Direta	Homopolar
0,325	1,274	0,411	1,783	0,129	0,560	$0,182 \times 10^{-6}$	$0,182 \times 10^{-6}$

2.2.3 Linha aérea

A linha aérea de MT da rede do CMSM, tal como se observa pelo esquema unifilar na Figura 2.1, possui um troço principal que interliga o PT Cav. Torre ao PT Correios, tendo derivações intermédias para os PT's aéreos e para o barramento do PT Oficinas. Não existem informações acerca do tipo de condutor, sabendo-se apenas que se trata de uma linha aérea com tensão nominal de 30 kV, composta por um condutor por fase, sem cabo de guarda e suportada por postes de betão. Devido à falta de informação, são assumidas hipóteses quanto às suas características. Atualmente, a forma construtiva mais usual para linhas aéreas consiste num núcleo de fios de aço entrançados, para suporte mecânico da linha, envolvidos por camadas de fios de alumínio igualmente entrançados que asseguram a condução de corrente, designado de condutor alumínio-aço (AA), ou tecnicamente por *AL1/ST1A*. Nos projetos de redes elétricas de MT da EDP Distribuição são largamente utilizados condutores AA com secção de 50 mm² [14], assumindo-se este tipo de condutor para a linha aérea interna do CMSM.

Consultando [12], obtêm-se as secções normalizadas e tipicamente usadas em Portugal para linhas aéreas constituídas por condutores alumínio-aço, entre as quais se encontra o condutor escolhido: AA50 (ou 42-AL1/7-ST1A). Na Tabela 2.10 constam os parâmetros relevantes do condutor mencionado.

Tabela 2.10: Especificações técnicas do condutor AA 50

Designação técnica	Secção (mm ²)	Diâmetro (mm)		R _{DC} @ 20°C (Ω/km)	I _{máx} (A)	Capacidade térmica face a c.c. (kA ² · s)
		Alma	Condutor total			
AA50 (42-AL1/7-ST1A)	49,5	3,00	9,00	0,676	205	13

Tendo em conta a corrente máxima admissível, a capacidade de transporte de uma linha trifásica composta por este tipo de condutores à tensão nominal é de 10,7 MVA. Quanto à resistência face a curto-

circuitos, pela capacidade térmica do condutor utilizado estima-se que a linha seja capaz de suportar 5,1 kA durante 0,5 segundos ($\sqrt{13/0,5} = 5,1 \text{ kA}$) ou 3,6 kA durante 1 segundo ($\sqrt{13/1} = 3,6 \text{ kA}$).

Importante referir que, de acordo com a topologia atual de exploração (Figura 2.2), a linha aérea escoia praticamente a totalidade da energia injetada no barramento de recepção do CMSM. Desta forma, fará sentido assumir que a capacidade de transporte desta linha seja da ordem das linhas aéreas de chegada da EDP, considerando o mesmo tipo de condutores para ambas.

Na modelação da linha aérea em *Simulink*, utiliza-se o mesmo modelo previamente considerado para os cabos subterrâneos. Desta forma, o cálculo das componentes simétricas da impedância e capacitância da linha é igualmente exigido. No cálculo destes parâmetros recorre-se a uma ferramenta da biblioteca *SimPowerSystems* [33] do *Simulink*, designada por *RLC Line Parameters* [15] e especificamente utilizada para o cálculo dos parâmetros RLC de linhas aéreas de transporte de energia. No Anexo B.2.1 encontra-se descrito o funcionamento desta ferramenta, bem como o exemplo prático de cálculo dos parâmetros da linha aérea em análise nesta secção. Os resultados obtidos constam na Tabela 2.11.

Tabela 2.11: Componentes simétricas da linha aérea

Resistência (Ω/km)		Indutância (mH/km)		Reatância indutiva (Ω/km)		Capacitância (F/km)	
<i>Direta</i>	<i>Homopolar</i>	<i>Direta</i>	<i>Homopolar</i>	<i>Direta</i>	<i>Homopolar</i>	<i>Direta</i>	<i>Homopolar</i>
0,676	0,821	1,263	4,978	0,397	1,564	$9,203 \times 10^{-6}$	$4,476 \times 10^{-6}$

2.2.4 Rede de distribuição a montante

A rede de distribuição a montante do CMSM é modelada de forma simplificada, considerando-se apenas as Subestações (SE) de Distribuição de Almourol e Olho de Boi e os ramais aéreos que as interligam aos pontos de recepção do CMSM. Naturalmente que entre as Subestações e o CMSM existirão ramificações do troço principal para outras localidades, um aspeto não relevante para o estudo efetuado.

De acordo com o modelo utilizado em *Simulink* para especificar as Subestações (ver Anexo B.1.3), é necessário ter conhecimento da potência de curto-circuito e do rácio X/R, associado à relação entre a reatância e a resistência referentes à impedância equivalente de Thévenin vista da Subestação. Consultando o relatório "Caracterização das Redes de Distribuição" [16], emitido em Março de 2017 pela EDP Distribuição, obtêm-se informações relativas às Subestações, como as potências de curto-circuito (S_{cc}) mínimas e máximas obtidas nos lado AT e MT e os regimes de exploração de neutro. Na Tabela 2.12 encontram-se os dados relevantes para as Subestações mencionadas.

Os rácios X/R ao nível das Subestações não são conhecidos, recorrendo-se à norma CEI 60909-0 [17] para obter um valor aproximado. De acordo com esta norma, quando não é conhecida a impedância equivalente da rede a montante, considera-se para redes de tensão nominal inferior a 35 kV que $R = 0,1 \cdot X$, o que dita uma relação $X/R = 10$.

Tabela 2.12: Potências de curto-circuito máximas e mínimas nas Subestações

Subestação de Distribuição	Tensões nominais (kV)	S _{cc} máxima		S _{cc} mínima		Regime de neutro
		AT (MVA)	MT (MVA)	AT (MVA)	MT (MVA)	
SE Almourol	60/30	750	172	291	128	Neutro aterrado por impedância limitadora
SE Olho de Boi	60/30	1071	419	506	205	Neutro aterrado por impedância limitadora

Relativamente às linhas de interligação da rede de distribuição à rede de MT do CMSM, as suas características construtivas são igualmente desconhecidas. Para que se possa efetuar um estudo de curto-circuitos na rede, além de ser imprescindível ter conhecimento das potências de curto-circuito ao nível das Subestações a montante da instalação do CMSM, é necessário ter noção das dimensões das linhas, uma vez que o comprimento e a secção das mesmas influencia o valor das suas impedâncias equivalentes, o que terá conseqüentemente peso na magnitude das correntes de curto-circuito na rede em estudo. Recorrendo a mapas da rede de distribuição em Portugal [16], obtêm-se estimativas para os comprimentos das linhas, encontrando-se na Tabela 2.13 os respetivos valores.

Tabela 2.13: Ligações entre as Subestações de Distribuição e o CMSM

Ponto de partida	Ponto de chegada	Tipo de ligação	Tensão nominal (kV)	Comprimento (km)
Subestação EDP Almourol	CMSM (PT Correios)	Linha aérea	30	13,1
Subestação EDP Olho de Boi	CMSM (PT Cav. Torre)	Linha aérea	30	22,2

Considera-se que as linhas aéreas da rede de distribuição possuem as mesmas características da linha interna da rede do CMSM, isto é, compostas igualmente por condutores alumínio-aço com secções de 50 mm² e caracterizadas pela mesma geometria e condições de instalação, seguindo a mesma ordem de raciocínio que levou à escolha deste condutor para a linha aérea interna do CMSM, bem como pelo facto de ser expectável que as capacidades de transporte das linhas sejam idênticas, aspeto referido na secção 2.2.3. Desta forma, as especificações técnicas e as componentes simétricas da impedância das linhas são iguais, encontrando-se os respetivos valores já apresentados nas Tabelas 2.10 e 2.11.

2.2.5 Cargas

Neste estudo não existe o interesse em caracterizar em detalhe as instalações de BT do CMSM. Por esta razão e de forma a simplificar a modelação da rede, todas as cargas de BT existentes a jusante de cada PT são agregadas numa única carga concentrada que engloba os consumos totais da respetiva unidade da instalação. O modelo utilizado em *Simulink* para representação das cargas, descrito no Anexo B.1.4, permite definir os valores de potência ativa e potência reativa que as caracterizam, possibilitando a simulação de diferentes cenários de carga para a rede do CMSM.

2.3 Trânsito de Energia

Após a especificação e modelação da rede, segue-se a avaliação do comportamento da rede de MT do CMSM em regime estacionário, tendo-se como principal objetivo otimizar as suas condições de exploração. Deste modo, procede-se ao cálculo da solução do TE para diferentes cenários de exploração com o intuito de analisar as diversas grandezas variáveis na rede: tensões nos barramentos, potências transitadas nos ramais, quedas de tensão e perdas na rede. Neste estudo, são considerados dois cenários de carga e três topologias distintas de exploração.

No cálculo do TE da rede, isto é, da solução do sistema em regime estacionário, recorre-se à ferramenta *Load Flow* [18] do *Simulink*, a qual utiliza o método iterativo de *Newton-Raphson*. O funcionamento desta ferramenta encontra-se descrito no Anexo B.2.2.

2.3.1 Cenários de carga

Com o intuito de simular situações distintas em termos de consumos de energia elétrica no CMSM, são definidos dois cenários de carga. Em simultâneo com a definição do primeiro cenário, procede-se à estimativa do fator de potência das cargas da instalação.

Cenário de carga I

Com o cenário de carga I, pretende-se refletir o cenário de maior exigência em termos de consumo para a realidade atual do CMSM. Na sua elaboração, tem-se por base a avaliação de consumos efetuada na secção 2.1.2, na qual foram estimadas as potências ativas máximas para seis dos quinze PT's do CMSM e que estão associadas à ponta anual da instalação (1322 kW). No entanto, é ainda necessário estimar a potência máxima referente a cada um dos restantes PT's, sabendo-se que a soma total das potências máximas consumidas nos mesmos perfaz cerca de 363 kW, valor onde estão também aglomeradas as perdas na rede de MT, não se podendo por esta razão efetuar uma distribuição direta dos 362 kW pelas cargas dos restantes PT's. Para contornar este aspeto, após uma primeira distribuição deste valor pelas cargas a jusante dos restantes PT's, não de forma equitativa, mas com base na potência nominal de cada um deles, recorre-se à ferramenta *Load Flow* para calcular iterativamente a solução do TE na rede e realizar ajustes nas cargas de forma a que no final se obtenha uma potência ativa injetada no barramento de receção do CMSM próxima da ponta anual (1322 kW). Uma vez que este cenário pretende traduzir fielmente a situação atual do CMSM, tem-se em conta o facto de algumas unidades da instalação encontrarem-se atualmente inutilizadas: 2^aBIMEC e Cinema.

Na elaboração do cenário I, falta determinar o fator de potência médio das cargas da instalação. Para tal, tem-se em conta a análise das faturas de eletricidade efetuada igualmente na secção 2.1.2, onde foi possível concluir que o valor de $\tan \phi$ médio da instalação total é necessariamente inferior a 0,3, ou

seja, no barramento de recepção do CMSM (PT Cav. Torre), a relação entre potências reativa e ativa dita um valor de $\tan \phi < 0,3$. Para determinar o fator de potência médio das cargas de BT de cada PT, recorre-se novamente à ferramenta *Load Flow*, simulando-se o TE para diferentes valores de $\cos \phi$ atribuídos às cargas. Numa primeira simulação, considera-se $\cos \phi$ igual a 0,9 ind. Na Tabela 2.14 constam os resultados obtidos para as simulações efetuadas.

Tabela 2.14: Variação da $\tan \phi_{med}$ da instalação com o fator de potência das cargas

$\cos \phi_{cargasBT}$	Potências injetadas no barramento de recepção da instalação		
	P (kW)	Q (kvar)	$\tan \phi_{med}$
0,90 ind.	1322,77	477,40	0,361
0,91 ind.	1322,77	477,40	0,332
0,92 ind.	1322,31	438,96	0,302
0,93 ind.	1322,09	399,96	0,271
0,94 ind.	1321,88	315,24	0,238

Constata-se que atribuindo às cargas fatores de potência superiores a 0,93 ind., a condição $\tan \phi < 0,3$ é satisfeita. Sendo assim, opta-se por assumir um fator de potência médio de 0,93 ind. para as cargas dos diversos PT's. Na Tabela 2.15 apresentam-se os valores das potências ativas e reativas consumidas em cada PT referentes ao cenário de carga I, utilizando-se o fator de potência estimado.

Tabela 2.15: Cenário de carga I

Posto de Transformação	Potência ativa consumida	Potência reativa consumida
	(kW)	(kvar)
PT Cavalaria Torre	60	24
PT Correios	120	47
PT Bairro de Oficiais	83	33
PT Bairro de Sargentos	120	47
PT GAC	100	40
PT Unidade de Apoio	189	75
PT Paiois	11	4
PT 1ªBIMEC	206	81
PT 2ªBIMEC	0	0
PT ETAR	21	8
PT Oficinas	40	15
PT Transmissões	104	41
PT Cavalaria Monobloco	240	95
PT Cinema	0	0
PT Depósito de Água	11	4

Cenário de carga II

Com o cenário de carga II, tem-se o objetivo de submeter a rede a um nível de consumos mais exigente e mais próximo da potência total instalada. Para tal, assume-se que os transformadores de cada PT estão a ser explorados a 80% da sua potência nominal, o que corresponde a um consumo total na

instalação de cerca de 3,5 MVA, mais do dobro do primeiro cenário de carga. Tendo em conta o nível de consumos atual do CMSM, trata-se de uma situação irrealista. No entanto, a análise do TE para este cenário tem como finalidade avaliar se, numa situação de maior exigência de carga, resultante da reativação de unidades atualmente inutilizadas, da inclusão de novos serviços ou do aumento da população no CMSM, o perfil de tensões se mantém satisfatório e as correntes de serviço não atingem valores próximos da capacidade máxima admissível em regime permanente pelos ramais de MT. No cenário II, atribui-se igualmente um fator de potência de 0,93 ind. às cargas dos PT's. Na Tabela 2.16 constam os consumos atribuídos a este cenário.

Tabela 2.16: Cenário de carga II

Posto de Transformação	Potência ativa consumida (kW)	Potência reativa consumida (kvar)
PT Cavalaria Torre	234	93
PT Correios	298	118
PT Bairro de Oficiais	298	118
PT Bairro de Sargentos	469	185
PT GAC	234	93
PT Unidade de Apoio	298	118
PT Paiois	37	15
PT 1ªBIMEC	186	74
PT 2ªBIMEC	298	118
PT ETAR	74	29
PT Oficinas	119	47
PT Transmissões	469	185
PT Cavalaria Monobloco	298	118
PT Cinema	119	47
PT Depósito de Água	37	15

2.3.2 Topologias de exploração

As possibilidades de reconfiguração topológica de uma rede estão diretamente associadas às redundâncias nela existentes. No caso particular da rede do CMSM, o facto de possuir uma configuração em anel e dois pontos de receção, permite um número considerável de topologias de exploração com capacidade de garantir a alimentação de todos os barramentos da rede. Na análise do TE são consideradas três topologias distintas, todas elas considerando uma exploração da rede em anel aberto.

Topologia I

Corresponde à topologia de exploração atual, apresentada na Figura 2.2. Nesta topologia, a linha aérea interna assume-se como um troço crítico, uma vez que serve de ponto de passagem de grande parte da potência injetada na rede. Caso o ponto de receção seja o barramento do PT Cav. Torre, apenas a unidade deste PT não depende da linha aérea. Se a entrada de alimentação for efetuada

pelo barramento do PT Correios, o fluxo de potência na linha aérea diminui, uma vez que o PT Correios serve diretamente de ponto de distribuição para outros PT's mediante ramais subterrâneos.

Ramais isolados: *PT Cav. Torre - PT Cav. Monobloco e PT Un. de Apoio - PT 1º BIMEC.*

Topologia II

A Topologia II, representada na Figura 2.6, difere da primeira apenas por possuir o troço de ligação entre a linha aérea e o PT Oficinas desativado, passando a estar em serviço o ramal *PT. Cav. Torre - PT Cav. Monobloco*. Esta alteração tem a intenção de diminuir a carga sobre a linha aérea da instalação, principalmente se o barramento de recepção for o PT. Cav Torre, uma vez que a ativação do ramal *PT. Cav. Torre - PT Cav. Monobloco* reduz significativamente a potência injetada na linha e, conseqüentemente, as correntes de serviço diminuem. No caso de a recepção ser feita pelo PT Correios, a situação é idêntica à Topologia I.

Ramais isolados: *Linha aérea (derivação 3) - PT Oficinas e PT Un. de Apoio - PT 1º BIMEC.*

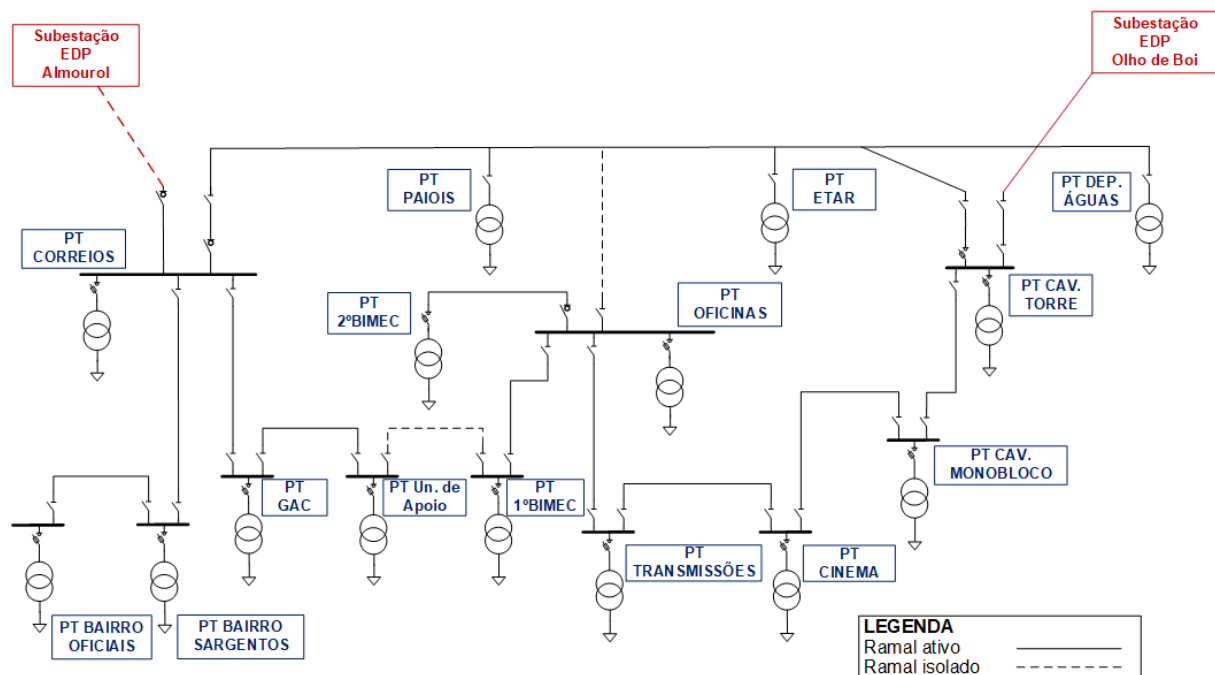


Figura 2.6: Esquema unifilar da Topologia II

Topologia III

A topologia III, representada na Figura 2.7, procura minimizar a exploração dos troços da linha aérea e maximizar a utilização da rede subterrânea. À exceção dos três PT's aéreos, os quais estão diretamente dependentes da linha aérea, todos os outros PT's não dependem desta e são alimentados através de ramais subterrâneos. Numa situação de descomissionamento ou manutenção da linha, esta topologia revela-se como a mais adequada, pois apenas três unidades sofrem interrupção de serviço, podendo ser apenas duas uma vez que nos Paiois existe um gerador de *backup* dedicado.

Ramais isolados: *Linha aérea (derivação 3) - PT Oficinas e Linha aérea (derivação 4) - PT Correios.*

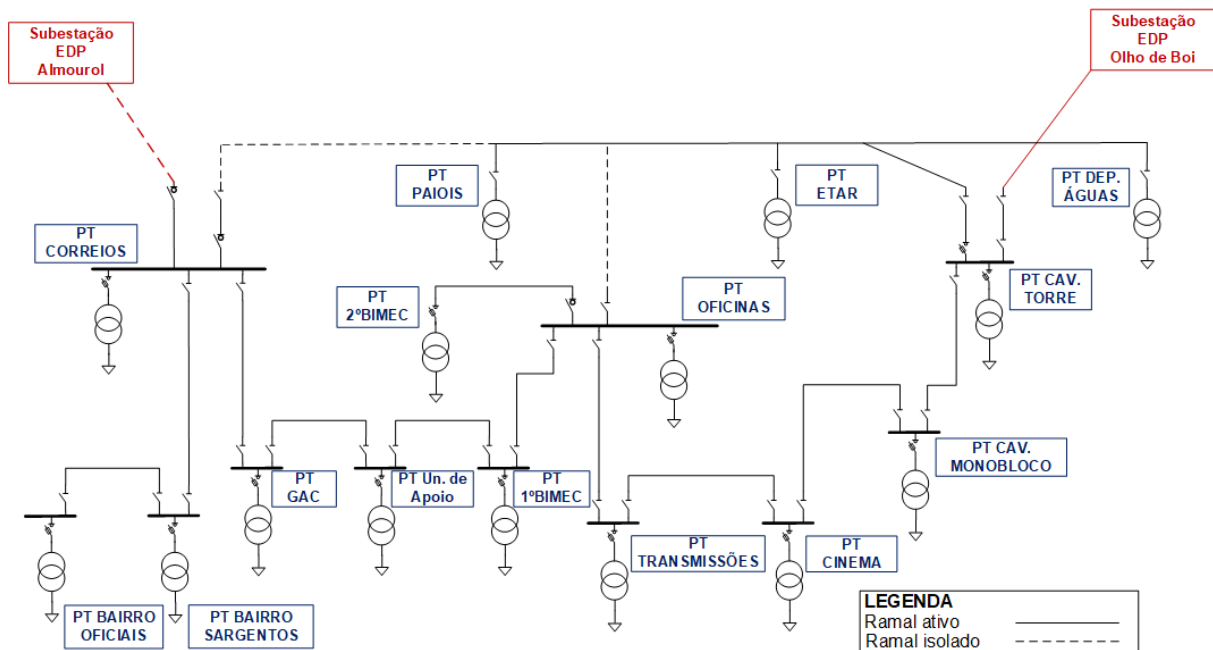


Figura 2.7: Esquema unifilar da Topologia III

2.3.3 Simulações do Trânsito de Energia

Após a definição dos cenários de carga e das topologias de exploração, definem-se as características das simulações do TE. Nas simulações, pretende-se que as condições de exploração da rede sejam idênticas à realidade, sendo necessário ter em conta os seguintes aspetos:

- **Tensão à saída das Subestações:** Ao nível das Subestações de Distribuição, de acordo com as normas da EDP para transformadores de potência (AT/MT) [19], o comutador de tomadas em serviço possui 23 escalões ($U_n \pm 11 \times 1,5\%$), atuando no lado do enrolamento primário (AT). Em Subestações de 60/30 kV, como SE Olho de Boi e SE Almourol, a tensão nominal do secundário do transformador em vazio é, por norma, regulada automaticamente para 31,5 kV (1,05 p.u.).
- **Regulação do perfil de tensões na rede:** O CMSM localiza-se numa zona rural onde tipicamente os pontos de consumo estão afastados das Subestações de Distribuição. Através dos transformadores existentes na instalação, o perfil de tensões pode ser regulado relativamente próximo dos pontos de consumo, uma vez que os transformadores de distribuição possuem geralmente capacidade de regulação de tensão em vazio a partir dos respetivos comutadores de tomadas, os quais têm tipicamente uma gama de regulação de $\pm 5\%$ em escalões de 2,5% [20].

Tendo em conta os aspetos referidos, nas simulações do TE assume-se que à saída das Subestações a montante do CMSM se verifica uma tensão regulada para 1,05 p.u. Relativamente às tomadas de exploração dos transformadores da instalação, faz-se uma distinção consoante o cenário de carga considerado:

- **Cenário de carga I:** Sendo o cenário de carga que reflete a realidade atual do CMSM, opta-se por considerar que os transformadores estão à tomada nominal (relação de transformação unitária). Com base nos resultados obtidos, será possível verificar se estas condições de exploração permitem a obtenção de um perfil de tensões adequado.
- **Cenário de carga II:** Sendo um cenário de carga significativamente mais exigente que o primeiro, as correntes de serviço e quedas de tensão serão naturalmente mais elevadas, considerando-se logo numa primeira análise que os transformadores estão a ser explorados na tomada referente ao escalão inferior ($\Delta U = -5\%$), o que dita uma relação de transformação igual a 0,95 p.u.

Para cada um dos cenários de carga, são realizadas simulações do TE considerando as três topologias de exploração definidas na secção 2.3.2, sendo que para cada topologia testam-se os dois pontos de receção da rede.

Os resultados do TE são apresentados graficamente em figuras com o esquema unifilar da rede, nas quais são identificadas as tensões obtidas nos barramentos e as potências transitadas nos ramais, sendo também apresentados os valores referentes às perdas de potências ativa e reativa no interior da rede de MT.

Dado o número considerável de simulações, somente as simulações que consideram a topologia de exploração atual (Topologia I), tendo em conta ambos os pontos de receção, são apresentadas de forma gráfica. Os respetivos resultados são visíveis nas Figuras 2.8 a 2.11.

Para as simulações do TE com as Topologias II e III, apenas são apresentados os principais resultados na Tabela 2.17, presente na secção 2.3.4 referente à análise de resultados.

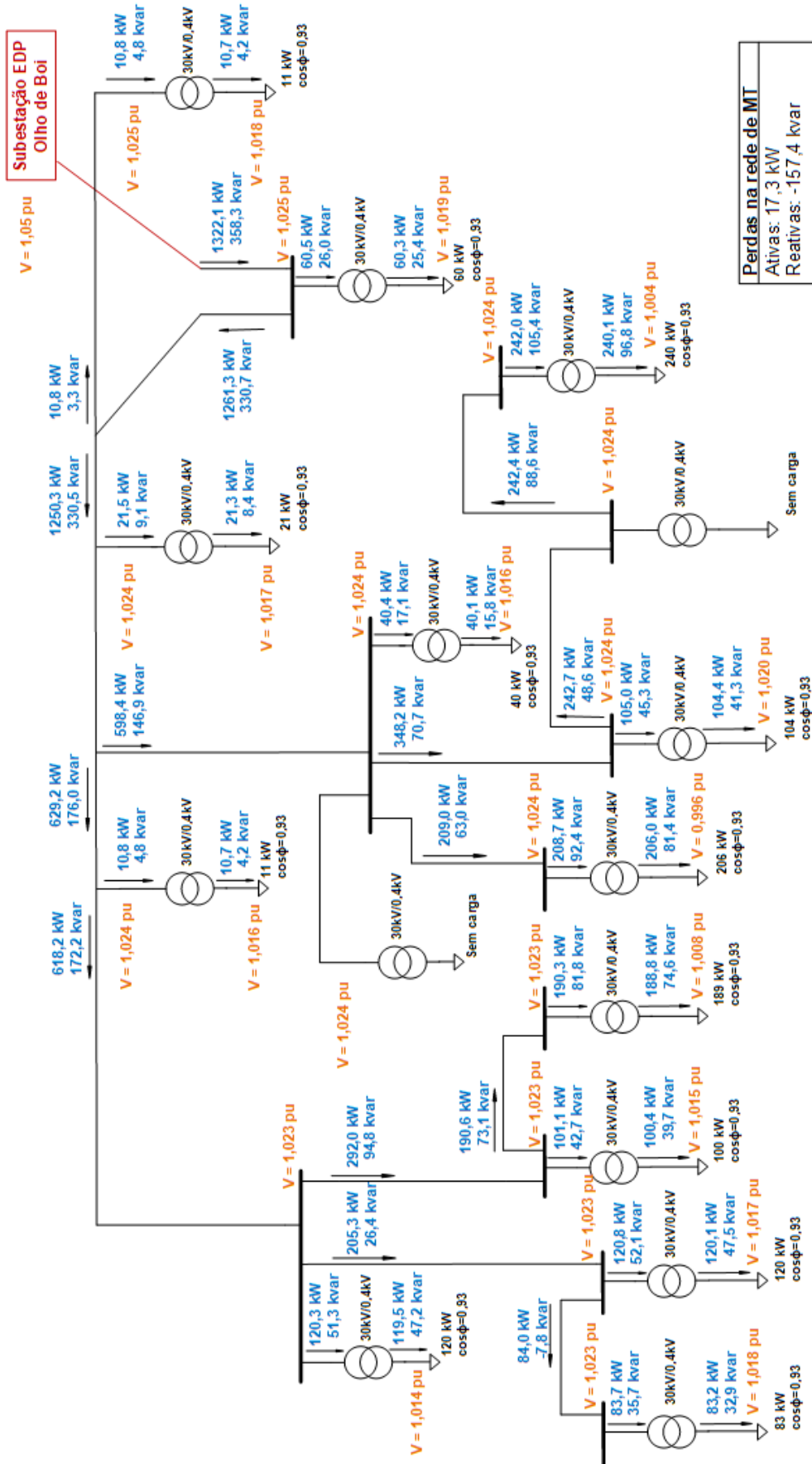


Figura 2.8: Cenário de carga: I; Topologia: I; Recepção: PT Cav. Torre

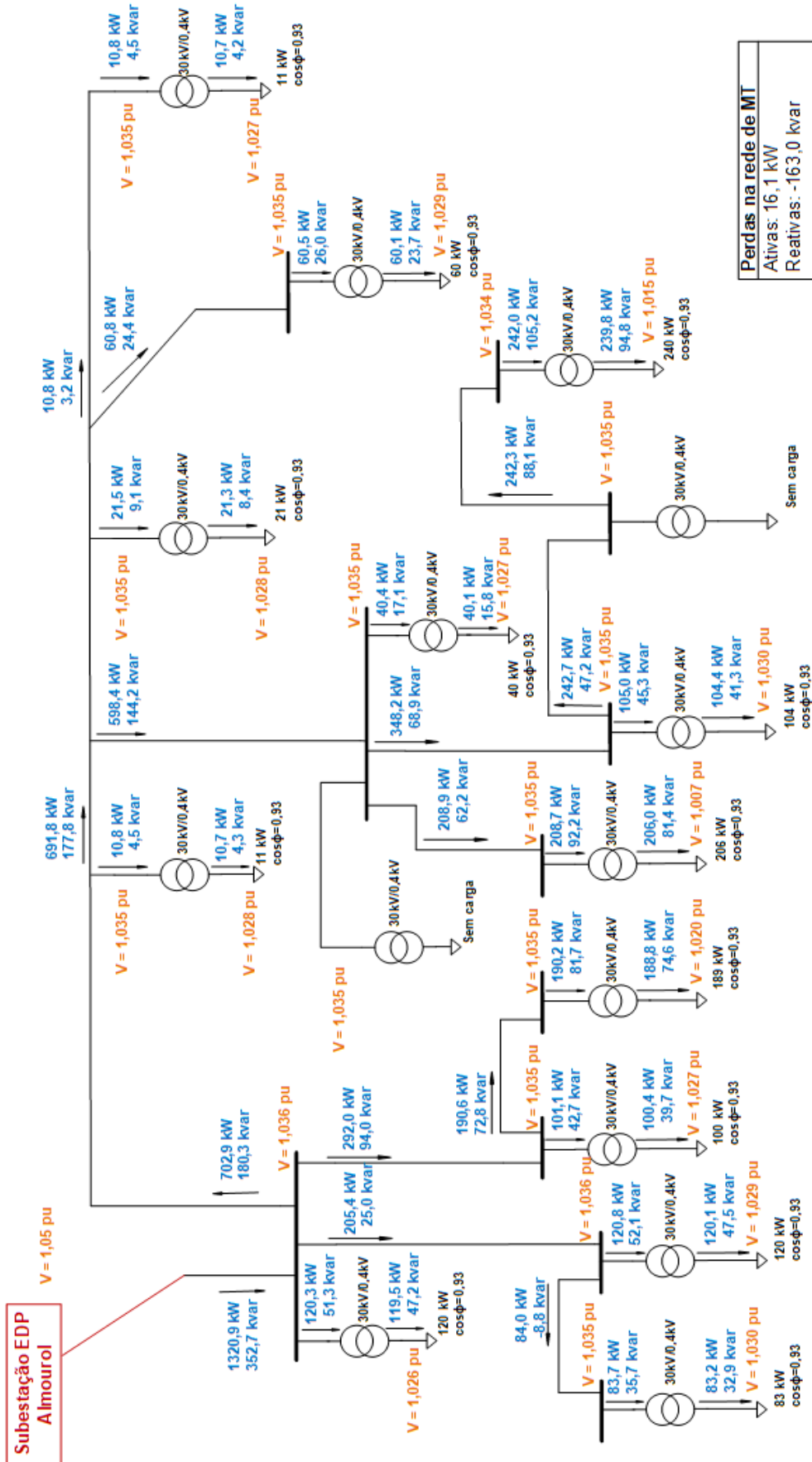


Figura 2.9: Cenário de carga: I; Topologia: I; Recepção: PT Correios

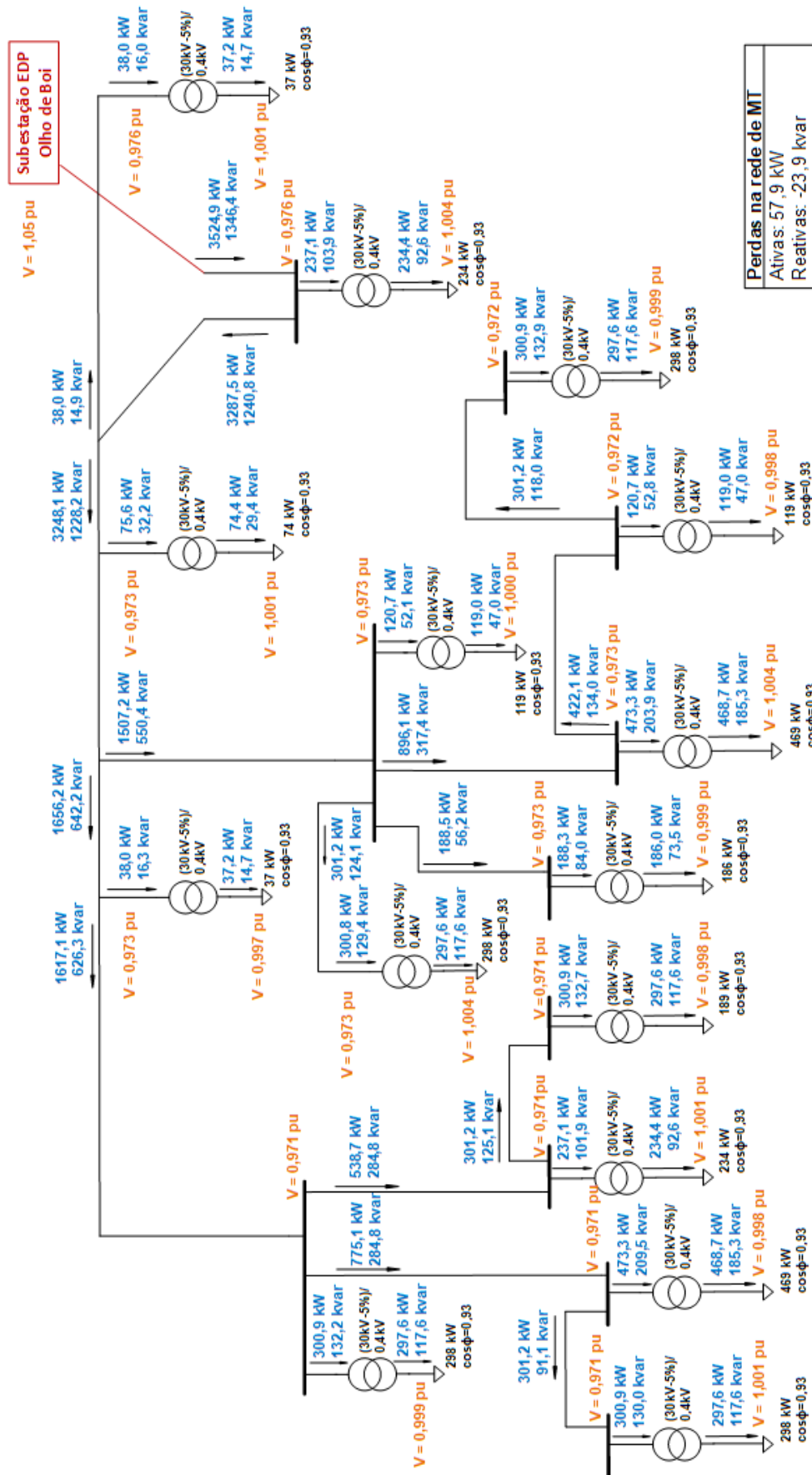


Figura 2.10: Cenário de carga: II; Topologia: I; Recepção: PT Cav. Torre

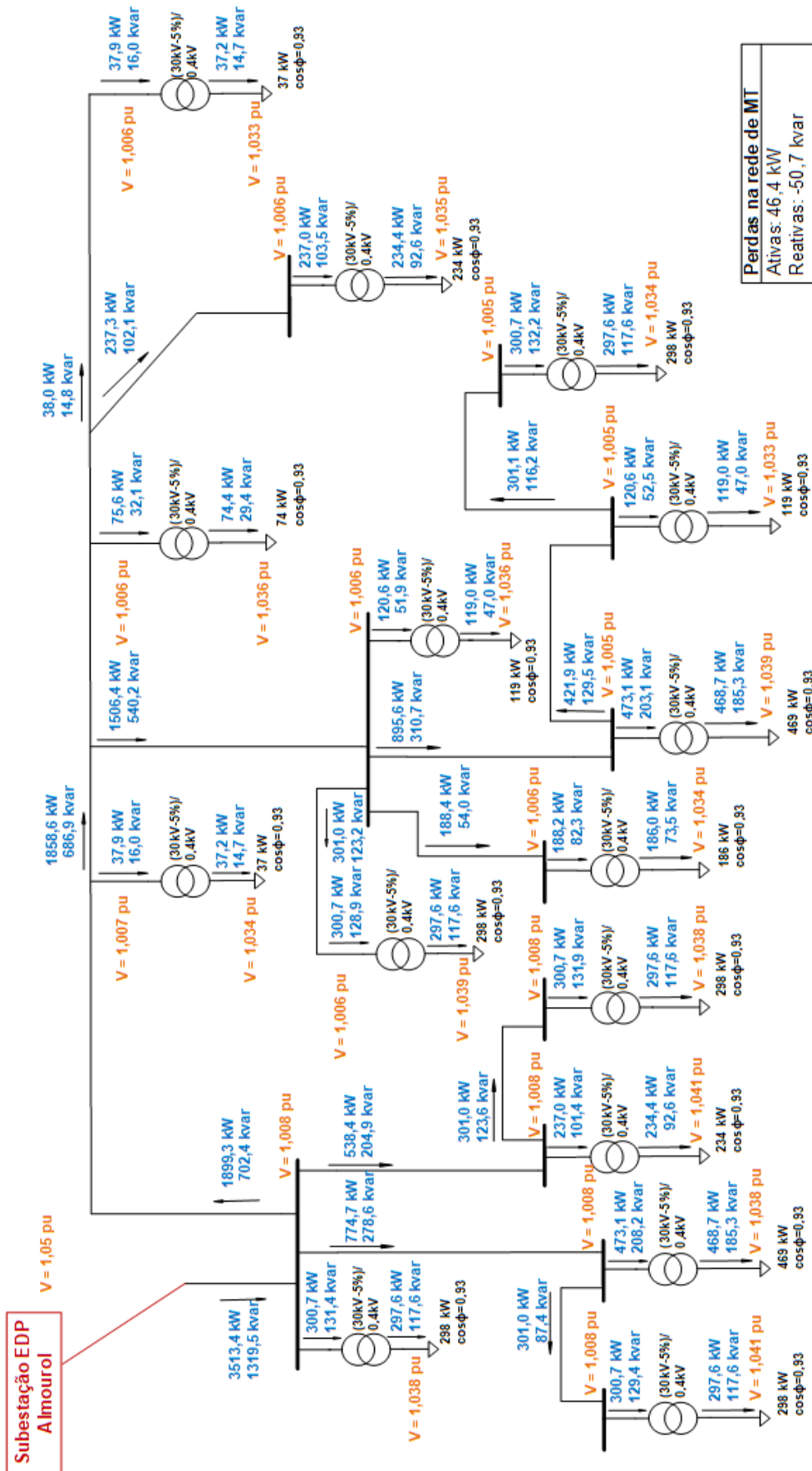


Figura 2.11: Cenário de carga: II; Topologia: I; Receção: PT Correios

2.3.4 Análise de resultados

Na Tabela 2.17 são apresentados os principais resultados das simulações do TE para os diferentes cenários de carga e topologias de exploração considerados. Numa primeira observação, constata-se que a variação dos resultados entre topologias é praticamente nula, concluindo-se que a configuração de exploração da rede pouco afeta o TE. Este aspeto é justificado pelo facto das impedâncias dos ramos da rede de MT serem relativamente reduzidas, fazendo com que a variação da impedância vista dos diferentes pontos da rede, de topologia para topologia, seja pouco significativa e se registem, para um mesmo cenário de carga, valores idênticos de potências consumidas, tensões de serviço e perdas.

Tabela 2.17: Resultados das simulações do TE

Cenário de carga	Topologia de exploração	Ponto de receção (RESP)	Potência consumida (RESP)		Tensões de serviço		Perdas	
			kW	kvar	MT (p.u.)	BT (p.u.)	kW	kvar
I	I	PT Cav. Torre	1322	358	1,02	0,99 - 1,02	17 (1,3%)	-157 (-44,0%)
		PT Correios	1321	353	1,04	1,01 - 1,03	16 (1,2%)	-163 (-46,2%)
	II	PT Cav. Torre	1321	325	1,02	1,00 - 1,02	16 (1,2%)	-190 (-58,4%)
		PT Correios	1321	321	1,04	1,01 - 1,03	16 (1,2%)	-195 (-59,1%)
	III	PT Cav. Torre	1322	293	1,03	1,00 - 1,02	17 (1,3%)	-223 (-76,1%)
		PT Correios	1321	287	1,04	1,01 - 1,03	16 (1,2%)	-229 (-79,8%)
II	I	PT Cav. Torre	3525	1346	0,97	0,99 - 1,00	58 (1,6%)	-24 (1,8%)
		PT Correios	3513	1320	1,01	1,03 - 1,04	46 (1,3%)	-51 (3,8%)
	II	PT Cav. Torre	3518	1312	0,98	1,00 - 1,01	51 (1,4%)	-59 (-4,5%)
		PT Correios	3517	1291	1,01	1,03 - 1,04	50 (1,4%)	-79 (-6,1%)
	III	PT Cav. Torre	3520	1282	0,98	1,00 - 1,01	53 (1,5%)	-88 (-6,9%)
		PT Correios	3513	1256	1,01	1,03 - 1,04	46 (1,3%)	-114 (-9,1%)

Potências transitadas

Um dos pontos da análise de resultados do TE passa por verificar que as potências transitadas não atingem valores próximos das capacidades máximas admissíveis dos ramos de MT. Nesta verificação, analisa-se de imediato as simulações submetidas ao cenário de carga mais exigente (cenário II), para as quais se regista uma potência injetada nos pontos de receção ligeiramente superior a 3,5 MVA, independentemente da topologia de exploração. Atendendo à capacidade de transporte dos ramos de MT (12,2 MVA para os cabos subterrâneos e 10,7 MVA para a linha aérea, ver secções 2.2.2 e 2.2.3), conclui-se de imediato que as correntes de serviço não se aproximam dos respetivos limites térmicos e que mesmo numa situação de carga próxima da potência instalada no CMSM, qualquer ramo de MT teria capacidade de transportar a totalidade da potência injetada na receção sem comprometer a sua integridade. Trata-se de um dado interessante para a automação da rede, uma vez que possibilita a implementação de automatismos que intervenham de forma segura na reconfiguração topológica da rede sem comprometer a alimentação de nenhuma parte da instalação.

Outro aspeto importante diz respeito à possível geração de potência reativa na rede de MT, uma

hipótese que já tinha sido colocada na secção 2.1.2. As linhas aéreas, quando sujeitas a uma carga inferior à sua potência natural, comportam-se como produtores líquidos, uma vez que a potência reativa produzida pela capacitância excede a absorvida pela indutância. Os cabos subterrâneos, elementos caracterizados por elevadas capacitâncias e potência natural, são na generalidade dos casos explorados com cargas inferiores à sua potência natural, comportando-se tipicamente como produtores líquidos de potência reativa. Para verificar esta situação na rede do CMSM, apresentam-se na Figura 2.12 os resultados relativos à geração de potência reativa nos ramais de MT para a simulação associada à Figura 2.8. Tal como previsto, a geração de potência reativa ocorre essencialmente ao nível da rede subterrânea, verificando-se uma geração superior nos cabos de maior comprimento, como os ramais PT Transmissões - PT Cinema (772 metros) ou PT Bairro Oficiais - Bairro Sargentos (845 metros), nos quais são gerados cerca de 40 kvar no cenário considerado.

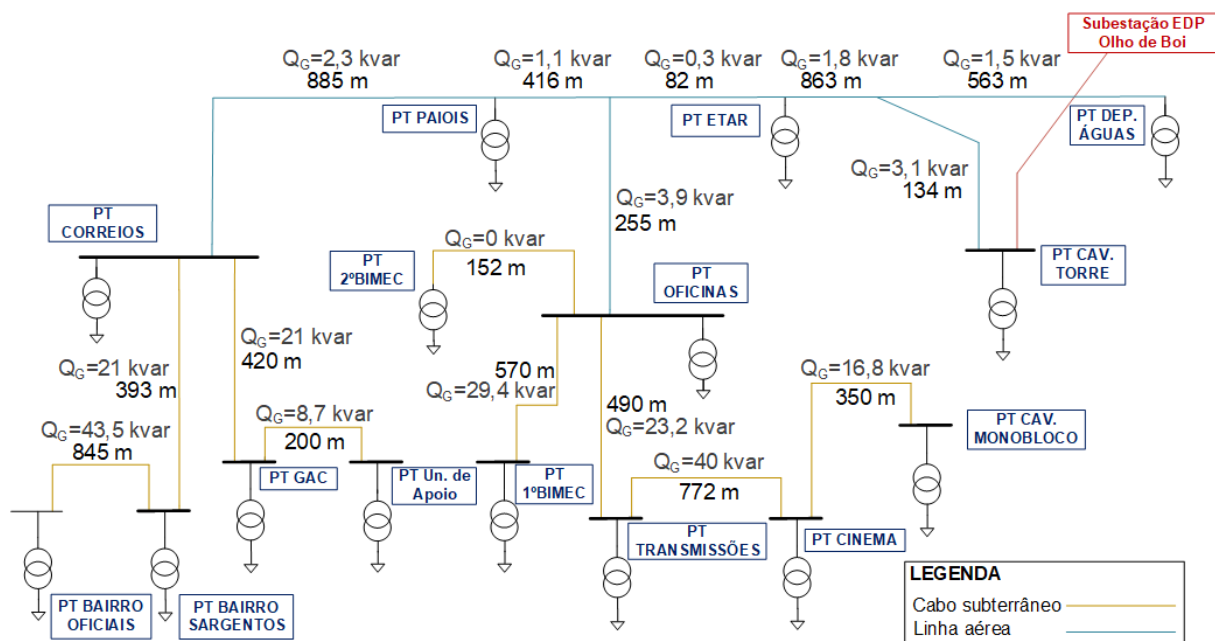


Figura 2.12: Potência reativa gerada na rede de MT

Quedas de tensão

As quedas de tensão ocorrem essencialmente nas linhas entre as Subestações e os pontos de receção da rede e ao nível dos transformadores da instalação, sendo ligeiramente superiores quando o barramento de receção é o PT Cav. Torre, uma vez que o comprimento da ligação deste ponto à SE Olho de Boi é quase o dobro da que interliga o PT Correios à SE Almourol. Nos ramais internos de MT, mesmo para o cenário de carga II, as quedas de tensão são praticamente inexistentes, aspeto justificado pelo facto de as correntes de serviço na MT e as impedâncias dos cabos/linhas serem reduzidas.

Comparando os dois cenários de carga em análise, naturalmente que se observam diferenças significativas nas tensões obtidas nos barramentos. Ao nível dos barramentos de MT, para o cenário de carga I verifica-se que as tensões nos barramentos de receção são de 1,03 p.u., quando a Subestação a mon-

tante é a SE Olho de Boi, e de 1,04 p.u. caso a rede seja alimentada pela SE Almourol. Para o cenário de carga II e devido ao aumento significativo das correntes de serviço, as tensões nos barramentos de receção caem, respetivamente, para 0,97 p.u. e para 1,01 p.u.

Os perfis de tensão no lado de BT da rede estão dependentes das relações de transformação dos transformadores. No cenário de carga I, para o qual se assume que os transformadores são explorados à tomada nominal, observa-se que as tensões na BT são próximas de 1 p.u., independentemente do ponto de receção. No entanto, nos cabos entre os QGBT's e os pontos de consumo ocorrerão ainda quedas de tensão, pelo que, com base nos resultados obtidos, será sensato explorar os transformadores com uma relação de transformação inferior à nominal (0,975 p.u. ou 0,95 p.u.). No cenário de carga II, nota-se uma diferença mais significativa nas tensões de serviço quando se altera o ponto de receção da rede, sendo esta justificada pelo facto de a rede estar sujeita a um cenário de carga significativamente mais exigente. Caso o ponto de receção seja o PT Correios, obtêm-se valores satisfatórios para as tensões na BT (1,03 - 1,04 p.u.). Quando a receção é feita pelo PT Cav. Torre, devido ao facto de o comprimento da linha proveniente da Subestação a montante ser superior, a queda de tensão neste troço já dita que ao nível da MT da rede do CMSM se tenham tensões inferiores a 1 p.u. e, mesmo com a relação de transformação dos transformadores minimizada ($m = 0,95$ p.u.), o perfil de tensões na BT é menos favorável, sendo ligeiramente inferior a 1 p.u. na maioria das unidades, o que ditará consequentemente tensões nos pontos de consumo inferiores à nominal. Apesar deste cenário refletir um nível de consumos improvável para a realidade atual do CMSM, os seus resultados não devem ser desprezados. A integração de uma fonte de geração própria no CMSM deve ser tida em conta, uma vez que proporciona a existência de geração local e contribui para uma melhor regulação do perfil de tensões da instalação, mesmo em cenários de carga mais exigentes.

Perdas

As perdas na rede do CMSM, verificam-se maioritariamente ao nível dos transformadores da instalação, sendo as perdas nos ramais de MT praticamente desprezáveis. No cenário de carga I, as perdas de potência ativa são próximas de 20 kW e no segundo cenário rondam os 50 kW, correspondendo em ambos os casos a um valor percentual ligeiramente superior a 1% da potência total injetada na rede.

No que toca a perdas de potência reativa, observa-se que são negativas, resultante do facto de a potência reativa gerada nos ramais de MT superiorizar-se aos consumos destes, dos transformadores e das cargas da instalação. Verifica-se que nas simulações com o cenário de carga I, as perdas de potência reativa variam entre -230 kvar e -160 kvar, sendo o maior valor (em módulo) referente à Topologia III, na qual a exploração dos ramais subterrâneos é superior e, consequentemente, a geração de potência reativa também. No cenário de carga II, as perdas situam-se entre -115 kvar e -25 kvar, constatando-se que são inferiores (em módulo) às do primeiro cenário, aspeto justificado pelo facto de a carga ser consideravelmente superior no segundo cenário, o que leva a que os ramais sejam explorados mais próximos da sua potência natural e a potência reativa gerada pelos mesmos seja menor.

2.4 Correntes de curto-circuito

O facto de estar em equação a integração de uma unidade de geração própria na micro-rede em perspetiva para o CMSM, torna necessária uma avaliação das correntes de curto-circuito na rede atual. O dimensionamento da micro-rede militar e do(s) recurso(s) de geração local exige uma verificação prévia de que os ramais atuais da rede suportam um hipotético aumento das potências de curto-circuito na instalação, resultante da presença de novas fontes alimentadoras de correntes de curto-circuito.

Nesta secção procede-se ao cálculo das correntes de curto-circuito na rede atual do CMSM para situações de defeito nos diversos barramento da instalação, analisando-se igualmente o perfil de tensões no momento pós-defeito.

2.4.1 Cálculo das correntes de curto-circuito

De acordo com a norma CEI 60909 [17], no planeamento de redes elétricas é imprescindível o cálculo das correntes de curto-circuito máximas, geralmente associadas a curto-circuitos trifásico simétricos, sendo determinantes na escolha do poder de corte dos disjuntores, na parametrização dos relés de proteção e na definição dos requisitos mínimos das máquinas e dos cabos/linhas necessários para garantir a estabilidade mecânica e térmica dos mesmos. Com o cálculo do valor eficaz da corrente inicial (I''_{k3}) resultante de defeitos trifásicos simétricos, pretende-se avaliar se os ramais existentes na rede suportam termicamente as correntes máximas de curto-circuito possíveis de se verificar na instalação, durante tempos de duração adequados (0,5 ou 1 segundos). A simulação da presença de defeitos no modelo da rede em *Simulink* é realizada através do bloco modelador descrito no Anexo B.1.7.

O cálculo das correntes de curto-circuito é efetuado tendo em conta a presença não simultânea de defeitos trifásicos simétricos francos em cada barramento da rede e considerando cada uma das Subestações de Distribuição (SE Olho de Boi e SE Almourol) na alimentação do CMSM, não sendo abordada a situação de exploração de ambas em paralelo, pois trata-se de um cenário impossível de suceder. Apenas é analisada a presença de curto-circuitos para a topologia atual (Topologia I), uma vez que independentemente da topologia escolhida, a variação da impedância equivalente de Thévenin vista de um qualquer ponto de defeito na rede é pouco significativa, o que dita que as correntes de curto-circuito sejam idênticas entre topologias. O método de cálculo das correntes de curto-circuito em *Simulink*, assim como das tensões pós-defeito, encontra-se descrito no Anexo B.2.4.

Nas Figuras 2.13 e 2.14 constam os valores eficazes das correntes de curto-circuito iniciais (I''_{k3}) obtidos em cada um dos barramentos MT e BT. Para cada barramento apresentam-se dois valores de I''_{k3} : o valor a verde corresponde à magnitude da corrente de defeito considerando a potência de curto-circuito máxima da Subestação, enquanto o valor a azul está associado à potência de curto-circuito mínima.

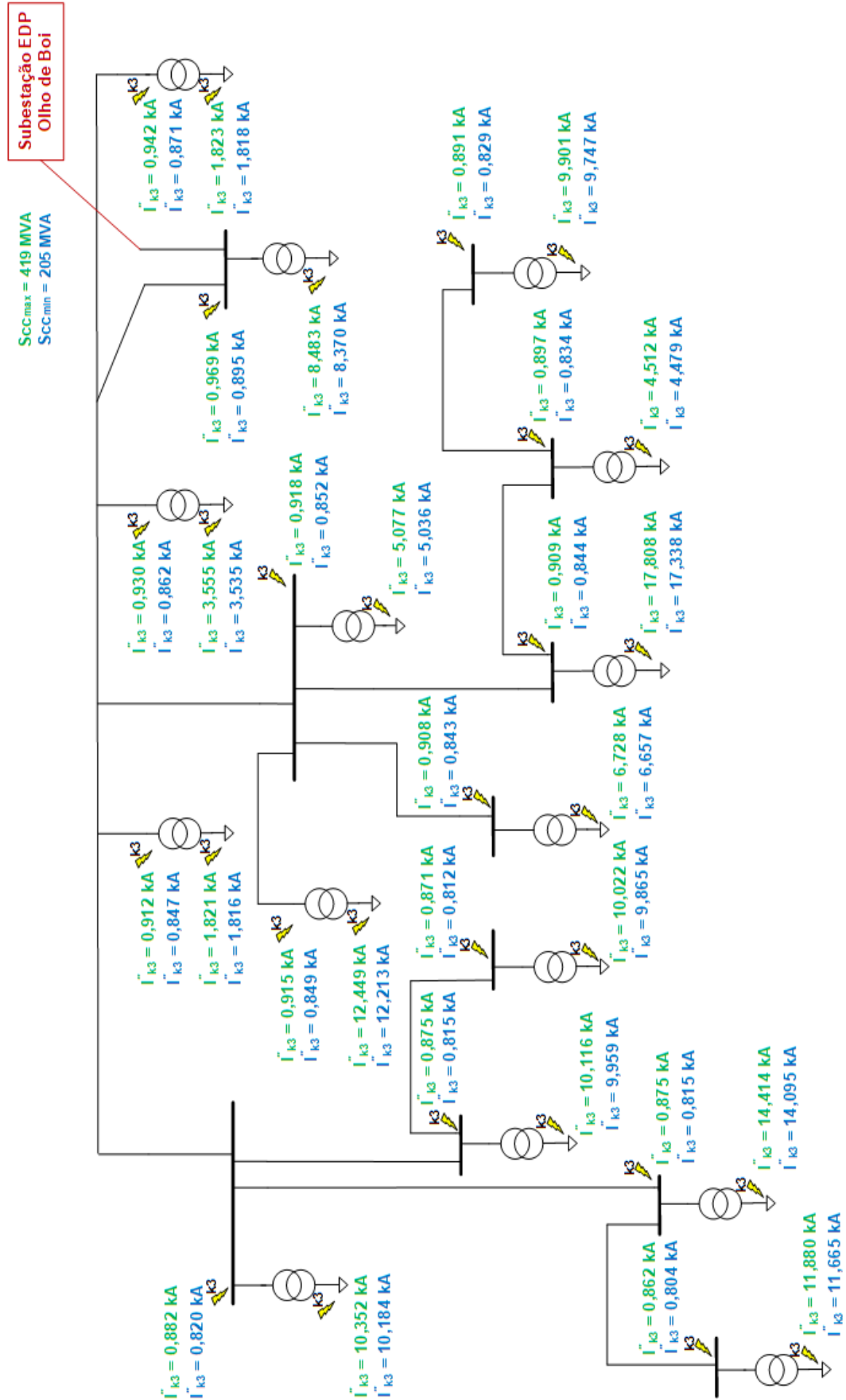


Figura 2.13: Correntes de curto-circuito (I''_{k3}) na rede atual (SE a montante: SE Olho de Boi)

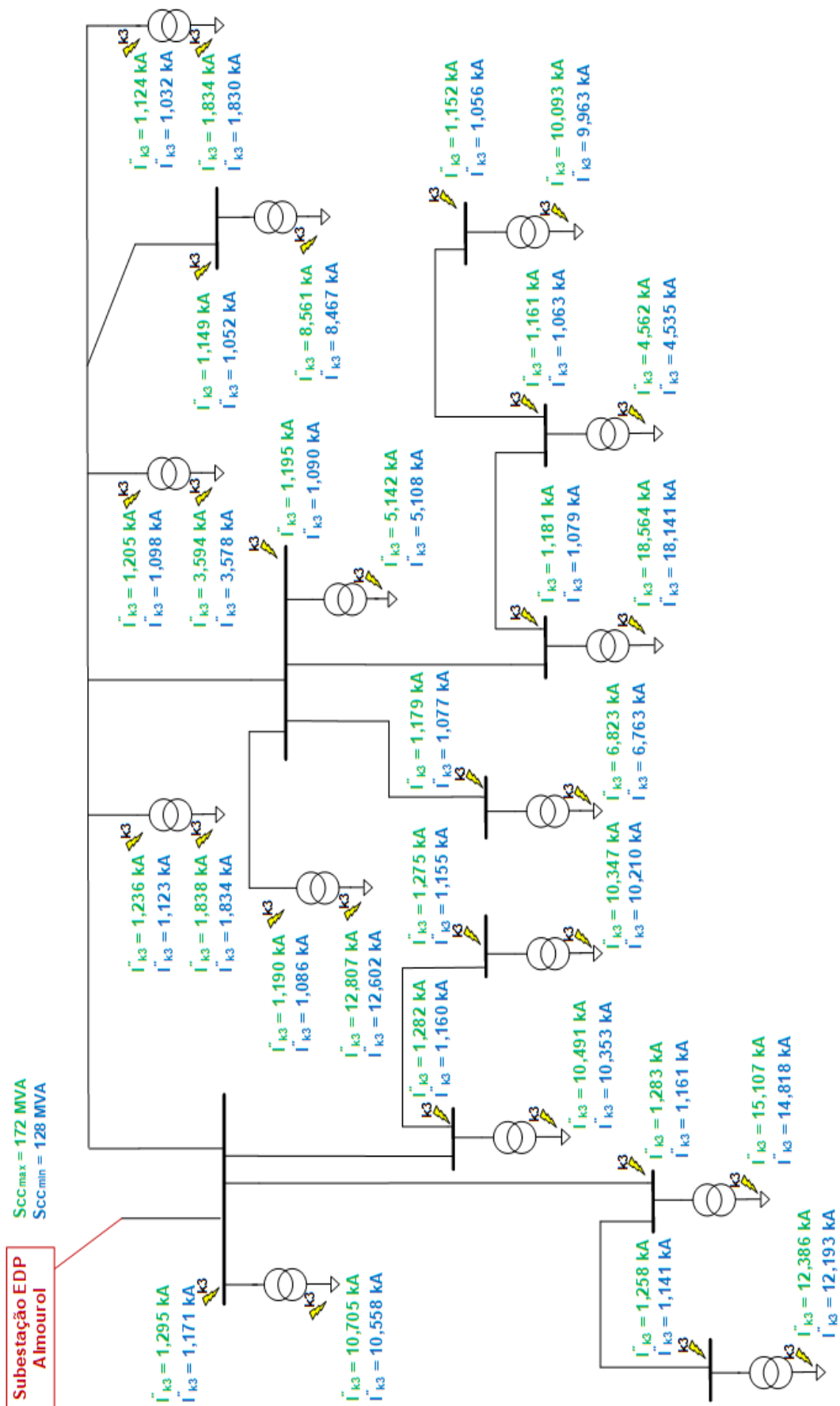


Figura 2.14: Correntes de curto-circuito (I''_{k3}) na rede atual (SE a montante: SE Almourol)

2.4.2 Tensões pós-defeito

Na análise das tensões pós-defeito, simula-se a presença de defeitos trifásicos simétricos na BT e MT da rede, com o intuito de verificar o perfil de tensões no momento imediatamente após a ocorrência de um curto-circuito num determinado ponto da instalação. Como ponto de localização de defeito seleciona-se o PT Oficinas, tratando-se de um ponto central da rede de MT da instalação.

Os resultados obtidos nas secções anteriores, em termos de TE e de correntes de curto-circuito, permitem concluir que as diferenças registadas entre a alimentação do CMSM ser efetuada através da SE Olho de Boi ou da SE Almourol não são significativas, levando a que as tensões pós-defeito sejam idênticas para ambos os cenários. Desta forma, apenas se procede à análise do perfil de tensões pós-defeito para o cenário de exploração em que a rede está a ser alimentada pela fonte atualmente utilizada em condições normais (SE Olho de Boi).

Defeito na Baixa Tensão

Na simulação da ocorrência de defeito na BT, considera-se a potência de curto-circuito máxima registada na SE Olho de Boi e que no momento pré-defeito a rede está sujeita ao cenário de carga I (ver secção 2.3.1). Na Figura 2.15 apresenta-se o perfil de tensões pós-defeito nos diversos barramentos da rede, definindo-se a entrada do QGBT do PT Oficinas como o ponto de defeito.

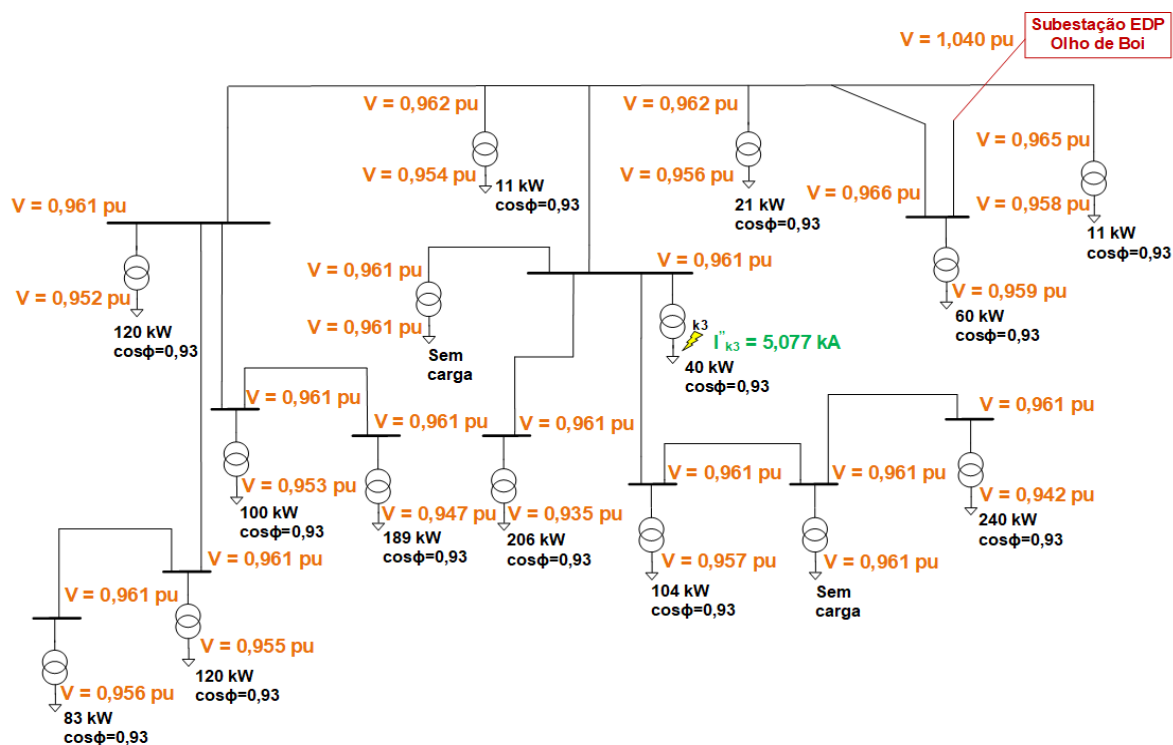


Figura 2.15: Tensões pós-defeito para c.c. na BT (Receção: PT Cav. Torre)

Defeito na Média Tensão

Para a ocorrência de defeito na MT, consideram-se as mesmas condições de exploração assumidas para a situação de defeito na BT. O ponto de defeito selecionado é o barramento de MT do PT Oficinas, apresentando-se na Figura 2.16 os resultados obtidos.

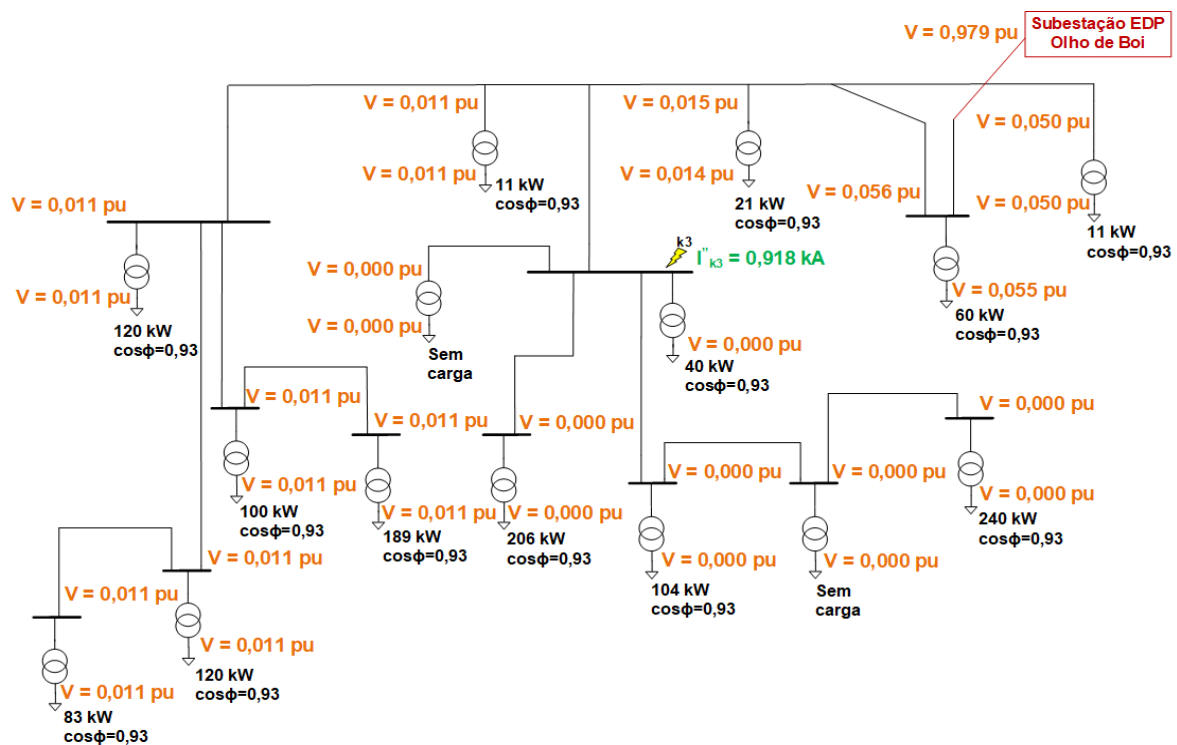


Figura 2.16: Tensões pós-defeito para c.c. na MT (Receção: PT Cav. Torre)

2.4.3 Análise dos resultados

Correntes de curto-circuito

Pelos resultados apresentados nas Figuras 2.13 e 2.14, referentes às correntes de curto-circuito (I''_{k3}) na rede atual do CMSM, constata-se que os respetivos valores eficazes são ligeiramente superiores para o caso em que a instalação é alimentada pela SE Almourol, apesar da potência de curto-circuito registada ao nível desta Subestação ser inferior à da SE Olho de Boi. Este aspeto justifica-se pelo facto de o comprimento da linha que interliga a SE Almourol ao respetivo ponto de receção do CMSM ser cerca de metade do que interliga a SE Olho de Boi ao respetivo ponto de receção, concluindo-se como seria expectável que as correntes de curto-circuito são significativamente limitadas pela impedância das linhas provenientes das Subestações.

Para curto-circuitos na MT, verifica-se que para defeitos nos diversos barramentos da rede, a variação da magnitude das correntes de curto-circuito é pequena, justificada pelo facto de a impedância dos ramais de MT do CMSM ter influência reduzida na impedância equivalente de Thévenin vista dos pontos

de defeito. Quando a montante se tem a SE Almourol, os valores de I''_{k3} situam-se entre 1,1-1,3 kA e, caso se trate da SE Olho de Boi, obtêm-se valores de I''_{k3} entre 0,8-1,0 kA.

Relativamente às correntes de curto-circuito no lado de BT da instalação, são naturalmente superiores às registadas na MT e são essencialmente limitadas pelos transformadores MT/BT. Para defeitos a jusante dos transformadores com impedâncias de curto-circuito mais elevadas, obtêm-se correntes máximas de defeito entre 1,8 - 3,4 kA. Para os transformadores com impedâncias inferiores, as correntes atingem valores eficazes superiores a 10 kA, registando-se o valor máximo para defeitos a jusante do transformador do PT Transmissões (17 - 19 kA).

Os cabos subterrâneos da rede de MT (ver secção 2.2.2) suportam correntes máximas de curto-circuito de 11,2 kA, enquanto que a linha aérea interna (ver secção 2.2.3) admite correntes máximas de 3,6 kA, ambas para uma duração máxima de 1 segundo. Os resultados obtidos nesta secção mostram que as correntes de defeito na MT não atingem valores superiores a 2 kA e, sendo expectável que as proteções estejam parametrizadas e coordenadas para atuar dentro de limites de tempo reduzidos de modo a não colocar em causa a integridade dos equipamentos, os ramais de MT existentes na rede do CMSM estão adequados às correntes de curto-circuito máximas da instalação.

Tensões pós-defeito

Para a situação de defeito na BT, observa-se pela Figura 2.15 que as tensões pós-defeito nos pontos não afetados da instalação se mantêm em valores próximos da tensão nominal (0,94 - 0,96 p.u.), verificando-se quedas de tensão inferiores a 0,1 p.u. relativamente às tensões de serviço registadas para o mesmo cenário de exploração (ver Figura 2.8). Desta forma, pode concluir-se que um defeito na BT não compromete significativamente a alimentação e o funcionamento seguro dos equipamentos de BT existentes. No ponto de defeito considerado, situado a jusante do PT Oficinas, obtêm-se uma potência de curto-circuito de cerca de 3,5 MVA, o que equivale a uma corrente de 70 A a um nível de tensão de 30 kV, um valor de corrente relativamente pequeno e que, conseqüentemente, proporciona quedas de tensão pouco significativas entre a Subestação e a instalação do CMSM, levando a que as tensões registadas no momento pós-defeito sofram quedas reduzidas face às tensões verificadas antes da ocorrência do curto-circuito.

No caso de defeito no barramento de MT da rede, verifica-se pela Figura 2.16 que as tensões no momento pós-defeito caem para valores próximos de zero na totalidade da instalação. Nesta situação, as correntes de curto-circuito que circulam na MT são próximas de 1 kA, o que proporciona quedas de tensão elevadas nos troços entre a Subestação e a rede do CMSM, levando a que a tensão obtida no ponto de receção seja praticamente nula. Conclui-se assim que, em caso de ocorrência de defeito na MT, a eliminação do mesmo deve ser efetuada no menor tempo possível, de modo a não comprometer a continuidade em serviço das cargas das restantes partes da instalação.

Capítulo 3

Integração de Unidade de Produção para Autoconsumo

A integração de uma unidade de geração própria no CMSM tem como principal objetivo garantir uma maior autonomia e segurança no fornecimento de energia elétrica à instalação do campo militar, proporcionando uma resiliência superior do CMSM face a influências externas, como interrupções na sua alimentação provocadas por defeitos na RESP. Dado o contexto atual, onde se verifica uma consciencialização ambiental crescente e uma promoção da produção de energia por meio de fontes renováveis, a escolha dos recursos energéticos distribuídos (RED's) a integrar no CMSM recai naturalmente em tecnologias de geração por meio de recursos renováveis.

Tendo em conta a localização do CMSM e o facto de ser rodeado por uma área florestal considerável, a utilização dos resíduos florestais (biomassa) para produção de energia apresenta-se como a solução mais proveitosa. Por esta razão e de forma a aproveitar os recursos endógenos do CMSM, considera-se que na futura micro-rede militar a unidade de produção para autoconsumo (UPAC) a integrar será uma central de biomassa. Além da energia gerada provir de recursos renováveis (biomassa), uma central de biomassa é uma fonte de geração controlável, despachável e que não depende das condições climáticas, contrariamente à energia eólica ou solar fotovoltaica.

Outra das vantagens de implementação de uma central de biomassa reside no facto de, uma vez tratar-se de uma central termoelétrica onde a máquina térmica é uma turbina a vapor, poder ser dimensionada como um sistema de co-geração e proporcionar a geração simultânea de energia elétrica e térmica a partir de uma única fonte primária (biomassa). Tendo em conta que o grosso dos consumos no CMSM, principalmente nos meses de Inverno, é em climatização (ver secção 2.1.2), a integração de um sistema de co-geração revela-se uma solução com interesse prático, permitindo aproveitar o calor (vapor de água) que não é possível converter em eletricidade para aquecimento de água e de espaços. Sendo assim, a central de biomassa é uma solução que permite aliar uma maior autonomia e segurança do CMSM à promoção da eficiência energética e sustentabilidade ambiental da instalação.

3.1 Enquadramento legislativo das UPAC's

Anteriormente ao dimensionamento da central de biomassa a integrar no CMSM, é importante fazer-se um enquadramento das UPAC's em Portugal. Em termos de legislação aplicável, é necessário reter as condições para integração de UPAC's que vêm mencionadas no Decreto-Lei nº153/2014 [21]:

- ***“A potência de ligação da Unidade de Produção seja menor ou igual a 100% da potência contratada no contrato de energia (...)”*** - a potência de ligação refere-se à potência máxima estabelecida contratualmente que o produtor pode injetar na RESP. A potência atualmente contratada no CMSM é de 2241,3 kW, sendo que a potência de ligação definida após a integração da central de biomassa terá de ser necessariamente inferior a este valor;
- ***“Quando se trate de uma UPAC, a potência instalada não seja superior a duas vezes a potência de ligação.”*** - a potência instalada refere-se à potência nominal (em kW e kVA) dos equipamentos de produção instalados. Consoante a potência de ligação estabelecida com o operador da RESP, poderá ser definido com mais critério a potência nominal da central de biomassa;
- ***“Dimensionar a UPAC de forma a garantir a aproximação, sempre que possível, da energia elétrica produzida com a quantidade de energia elétrica consumida na instalação elétrica de utilização.”*** - trata-se de um dos deveres do produtor. No entanto, o produtor tem direito *“(...) a exportar eventuais excedentes para a RESP”*;
- ***“Não é aplicável aos produtores, no exercício da atividade de produção de eletricidade para autoconsumo, a obrigação de fornecimento de energia reativa.”*** - sendo assim, a central poderá ser explorada com um fator de potência próximo do unitário;

3.2 Dimensionamento da central de biomassa

A integração da central de biomassa no CMSM como um sistema de co-geração, além de provocar alterações nas condições de exploração da rede, vai influenciar positivamente o nível de consumos elétricos da instalação, uma vez que a energia térmica gerada contribui para diminuir as necessidades de energia elétrica. Nesta secção é definido um novo cenário de carga, o qual considera o facto de parte dos consumos serem satisfeitos pelo calor produzido na central. Com base no cenário de carga elaborado, procede-se a um dimensionamento superficial da central de biomassa em perspetiva para o CMSM e à elaboração de soluções relativas à sua integração na rede.

Numa fase de implementação real da central, será necessário um estudo mais aprofundado da instalação de modo a determinar o ponto ótimo de localização da central no interior do campo militar, com o intuito de rentabilizar ao máximo o aproveitamento do calor gerado pelo sistema de co-geração. A estimativa da quantidade de biomassa necessária para satisfazer a totalidade dos consumos e o dimensionamento das condutas de distribuição de calor pela instalação são tópicos fora do âmbito deste trabalho.

3.2.1 Cenário de carga

A elaboração de um novo cenário de carga tem por base a ponta de consumos de energia elétrica registada atualmente e a forma como esta poderá diminuir com a integração do sistema de co-geração.

Assume-se que os consumos em aquecimento passam a ser totalmente satisfeitos pela energia térmica gerada no sistema de co-geração, o que dita que, em termos elétricos, a ponta da instalação durante o Inverno passe a assemelhar-se à ponta de Verão, período do ano em que os consumos em climatização são significativamente menores e os que existem são essencialmente em refrigeração.

Não é considerada a hipótese de implementação de um sistema de tri-geração (para produção de frio), pelo que a refrigeração dos espaços será igualmente realizada através de equipamentos elétricos, o que implica que durante o Verão os consumos sejam satisfeitos praticamente na totalidade por energia elétrica, dissipando-se grande parte do calor gerado, apenas aproveitado para o aquecimento de água. Nestas condições, a ponta de Verão corresponde à ponta anual do CMSM e, conseqüentemente, ao cenário de carga mais crítico, resultante do facto de no Inverno os consumos em aquecimento serem agora totalmente satisfeitos termicamente. Desta forma, estima-se que com a integração da central, a potência elétrica máxima de consumo da instalação seja próxima da ponta atual de Verão - cerca de 570 kW (ver secção 2.1.2). O cenário de carga III, apresentado na Tabela 3.1, reflete o que pode ser a nova realidade de consumos da instalação com a presença da central, sendo definido através do mesmo raciocínio utilizado na elaboração dos cenários de carga anteriores (ver secção 2.3.1).

Tabela 3.1: Cenário de carga III

Posto de Transformação	Potência ativa consumida	Potência reativa consumida
	(kW)	(kvar)
PT Cavalaria Torre	26	10
PT Correios	52	20
PT Bairro de Oficiais	36	14
PT Bairro de Sargentos	52	20
PT GAC	43	17
PT Unidade de Apoio	81	32
PT Paióis	5	2
PT 1ªBIMEC	89	35
PT 2ªBIMEC	0	0
PT ETAR	9	4
PT Oficinas	17	7
PT Transmissões	45	18
PT Cavalaria Monobloco	103	41
PT Cinema	0	0
PT Depósito de Água	5	2

3.2.2 Soluções de integração

Em termos de solução tecnológica para o sistema de co-geração, considera-se que a conversão de energia na central é efetuada de acordo com o ciclo de Rankine, utilizando uma turbina a vapor de contra-pressão, a qual é acionada por vapor de água a alta pressão resultante da combustão direta do combustível (biomassa) numa caldeira. Para este tipo de tecnologia, têm-se as seguintes características

operacionais para uma central de co-geração [22]:

- **Rendimento elétrico:** 10% - 40%;
- **Rendimento térmico:** 40% - 60%;
- **Rendimento global:** 60% - 85%;
- **Potência típica (MW_e):** 0,5 - 100;
- **Relação $P_{termica}/P_{elettrica}$:** 2 - 10;
- **Investimento ($€/kW_e$):** 700 - 900;

Tendo por base as características acima referidas e o enquadramento legislativo das UPAC's (ver secção 3.1), procede-se à elaboração de duas soluções de integração de uma central de biomassa no CMSM, as quais diferem na potência nominal do grupo gerador e no ponto de injeção de potência. Dado que os consumos em aquecimento passam a ser satisfeitos pela energia térmica produzida no sistema de co-geração, o respetivo gerador pode ser dimensionado com potências nominais inferiores relativamente a um cenário onde todos os consumos fossem satisfeitos eletricamente.

Solução A - Injeção na BT

Esta solução visa maximizar o aproveitamento da instalação atual e reduzir ao mínimo o investimento com a integração da central. Neste sentido, aproveita-se um dos transformadores de potência superior existentes no CMSM (630 kVA - PT Transmissões ou PT Bairro de Sargentos) como ponto de interligação da central à rede de MT do CMSM. Entre os dois PT's mencionados, opta-se por assumir o PT Transmissões como o ponto de injeção da potência gerada pela central, sendo esta conectada ao lado de BT do transformador desta unidade.

A determinação da potência nominal da central de biomassa para esta solução baseia-se no cenário de carga III, elaborado na secção 3.2.1. Além de satisfazer o nível de consumos definido pelo cenário mencionado, a central tem ainda que alimentar os seus serviços auxiliares, os quais estão associados ao processamento da biomassa, aquecimento da caldeira, sistema de controlo e operação da central, entre outros. Como estimativa, assume-se que as cargas dos serviços auxiliares consomem 10% da potência ativa gerada pelo gerador da central, com $\cos\phi$ igual a 0,9. Deste modo, o gerador da central tem de debitar em potência ativa cerca de 627 kW (570 kW para a rede do CMSM + 10% deste valor para os serviços auxiliares) para satisfazer os consumos internos da central e de toda a instalação. No pior cenário, a relação $P_{termica}/P_{elettrica}$ dita que por cada kW_e , são gerados 2 kW_{th} . Nesta situação são gerados cerca de 1254 kW_{th} e, em condições ideais, nas quais se assume que as perdas nas condutas do sistema de aquecimento central são reduzidas, este valor será suficiente para cobrir os consumos em aquecimento durante o Inverno, que correspondem no máximo a cerca de 2/3 da ponta anual da instalação atualmente (1322 kW, ver secção 2.1.2).

Outro ponto importante no dimensionamento da central está relacionado com o facto de esta ter de gerar potência reativa suficiente para regular e otimizar as tensões de serviço, de modo a garantir que nos pontos de consumo a tensão seja próxima de 1 p.u., um aspeto de especial importância para o funcionamento da micro-rede desconectada da RESP (modo ilha). Tendo em conta a ponta da instalação definida no cenário de carga III (570 kW) e que parte da potência gerada na central é imediatamente absorvida pela carga a jusante do PT Transmissões (45 kW, ver Tabela 3.1), significa que são injetados cerca de 525 kW no transformador deste PT. Isto implica que, estando o gerador a debitar uma potência ativa constante de 627 kW, o fator de potência mínimo da instalação visto a montante do transformador do PT Transmissões, para que não seja excedida a potência nominal do transformador referido, está limitado a $525/630 \approx 0,83$, sendo o valor de 525 kW a potência ativa injetada no transformador e 630 kVA a potência nominal do mesmo. Este aspeto limita a potência reativa máxima gerada pela central, mas dado que o fator de potência médio atual da instalação é superior a 0,958 (ver secção 2.1.2), existe uma margem de manobra considerável para a geração de potência reativa neste cenário.

Com base na análise efetuada, considera-se para solução A um gerador de 700 kVA, estimando-se um investimento de cerca de 500.000 € - 650.000 € para a central de co-geração desta solução. De acordo com os resultados do TE, apresentados posteriormente na secção 3.4, o gerador selecionado ajusta-se ao cenário de carga para o qual é aqui dimensionado.

Solução B - Injeção na MT

Com a solução B pretende-se que a totalidade da potência gerada pela central seja injetada na rede de MT do CMSM. Deste modo, exige-se o investimento num novo transformador para interligar a central diretamente à rede de MT, tendo este a função de elevar a tensão de geração para 30 kV. Quanto ao ponto de injeção, considera-se um dos barramentos de receção da RESP: o barramento do PT Cav. Torre ou do PT Correios, optando-se pelo primeiro. Esta escolha permite simplificar a solução devido ao facto do sentido dos fluxos de potência nos ramos de MT não sofrer quaisquer alterações, independentemente do CMSM estar a ser alimentado unicamente pela RESP, pela central ou por ambas, o que significa que o esquema atual de proteções, em termos de seletividade de disparos, estaria praticamente ajustado a qualquer um dos modos de exploração e não necessitaria de alterações profundas.

Na definição da potência nominal da central da solução B, pretende-se ter em conta a possibilidade de futuramente o nível de consumos do CMSM poder sofrer um aumento significativo. Por esta razão, opta-se nesta solução por considerar um gerador de 1600 kVA, assumindo-se que os consumos poderão vir a ser mais do dobro dos estimados no cenário de carga III (ver secção 3.2.1) e utilizados no dimensionamento da solução A.

Para o transformador elevador existente à saída da central, considera-se uma potência nominal de 1600 kVA, sendo compatível com o gerador escolhido. A definição dos parâmetros do transformador segue o mesmo raciocínio utilizado na secção 2.2.1, aquando da caracterização dos transformadores existentes na instalação, constando na Tabela 3.2 as especificações técnicas do novo transformador.

Tabela 3.2: Parâmetros do transformador elevador a montante da central

S_{nT} (kVA)	U_{n1} / U_{n2} (kV)	u_{cc} (%)	P_{cc} (W)	P_0 (W)	Z_T (p.u.)	R_T (p.u.)	X_T (p.u.)	R_1, R_2 (p.u.)	X_1, X_2 (p.u.)	R_m (p.u.)	X_m (p.u.)
1600	30/0,4	6	17000	1700	0,0600	0,0106	0,0591	0,0053	0,0296	941,2	100,8

Em termos de investimento, a central de co-geração da solução B rondará 1.200.000 € - 1.500.000 €, contabilizando também o novo transformador.

3.2.3 Especificação do gerador da central

Para ambas as soluções de integração da central considera-se uma tensão de geração de BT (400 V), um nível de tensão que se ajusta às potências nominais definidas para os geradores. Nota para o facto de a solução A, na qual a injeção da potência gerada pela central é efetuada ao nível da BT da rede do CMSM, requerer obrigatoriamente este valor de tensão de geração, de forma a ser compatível com o respetivo ponto de injeção.

Quanto às características técnicas do gerador, trata-se de uma máquina síncrona trifásica com rotor de pólos salientes constituído por 2 pares de pólos, um tipo de gerador que pode ser aplicado ao nível de centrais termoelétricas de pequena dimensão, caso da central de biomassa em equação para o CMSM. Consultando catálogos de fabricantes [23], obtêm-se valores típicos dos parâmetros relativos às características elétricas e constantes de tempo em regime transitório para os geradores caracterizados nesta secção, os quais são apresentados nas Tabelas 3.3 e 3.4, respetivamente.

Tabela 3.3: Parâmetros dos geradores síncronos - características elétricas

Solução	S_{nG} (kVA)	U_n (kV)	f (Hz)	pp	X_d (p.u.)	X'_d (p.u.)	X''_d (p.u.)	X_q (p.u.)	X''_q (p.u.)	X_i (p.u.)	X_0 (p.u.)	R_s (p.u.)	H (s)
A	700	400	50	2	2,90	0,24	0,12	1,60	0,15	0,14	0,04	0,02	0,2
B	1600	400	50	2	3,25	0,31	0,16	1,85	0,17	0,16	0,04	0,01	0,3

Tabela 3.4: Parâmetros dos geradores síncronos - constantes de tempo

Solução	T''_{d0} (s)	T'_{d0} (s)	T''_d (s)	T'_d (s)	T''_{q0} (s)	T'_{q0} (s)	T''_q (s)	T'_q (s)	T_a (s)
A	0,016	1,950	0,160	0,016	0,160	0,160	0,016	0,16	0,022
B	0,020	3,100	0,300	0,018	0,200	0,200	0,020	0,200	0,034

Estes parâmetros são requeridos como *input* pelo modelo utilizado na especificação de geradores síncronos. Tal como se representa no modelo completo da central de biomassa, onde consta igualmente o bloco modelador do gerador (ver Anexo B.1.5), o grupo gerador da central é composto por um regulador de velocidade, que atua na turbina e assegura o controlo primário da frequência, e por um regulador de tensão (sistema de excitação) para o controlo da tensão de saída do gerador. Para que a estabilidade da micro-rede seja assegurada após a transição para a exploração em ilha, o grupo gerador terá também de ser dotado de um sistema automático de comutação que altere o seu modo

de funcionamento de controlo das potências ativa e reativa geradas (nó PQ) para controlo da tensão e frequência (nó de balanço) da rede isolada, ajustando prontamente a velocidade de rotação da turbina com o intuito de efetuar um seguimento da carga da instalação.

3.3 Modos de exploração da micro-rede

Com integração da central de biomassa, dota-se a instalação do CMSM de um recurso energético próprio e possibilita-se que a micro-rede militar possa ser explorada isoladamente da RESP e deixe de depender exclusivamente desta. Consequentemente, passam a existir três modos de exploração da micro-rede do CMSM:

- **Modo atual:** a micro-rede é alimentada unicamente pela RESP, tal como sucede atualmente. Esta situação apenas se verifica caso a central de biomassa esteja fora de serviço;
- **Modo paralelo:** a micro-rede é alimentada em simultâneo pela RESP e pela central. Nesta situação, o funcionamento do gerador da central caracteriza-se como um barramento PQ, fixando-se os valores das potências geradas, ou como um barramento PV, para o qual a potência ativa gerada é constante e a tensão aos terminais do gerador é automaticamente regulada para o valor de referência, sendo a potência reativa produzida/consumida uma variável dependente. A RESP atua como nó de balanço e garante o equilíbrio de potências e a estabilidade da frequência da rede;
- **Modo ilha:** A micro-rede é desconectada da RESP e explorada isoladamente, passando a central de biomassa a fazer o seguimento da carga da instalação e a regular a frequência e a tensão da rede em ilha.

Em condições normais a micro-rede estará conectada à RESP, cenário em que a central pode ser explorada à sua capacidade nominal, satisfazendo parte ou a totalidade das cargas da instalação e injetando eventuais excessos de potência gerada na RESP. O modo paralelo permite rentabilizar ao máximo a utilização da central e dita a situação mais vantajosa para o CMSM, quer em termos de segurança no fornecimento de energia à instalação, quer em termos económicos devido à opção de venda do excedente de energia ativa à RESP [21] em situações de excesso de geração local. A alteração de modo de exploração da micro-rede está diretamente associada à disponibilidade das suas fontes de alimentação.

3.4 Trânsito de Energia

Com a análise do TE, pretende-se verificar como a presença da central de biomassa pode contribuir positivamente para uma melhoria da qualidade de serviço na rede do CMSM, sendo efetuadas diversas simulações do TE com o intuito de avaliar a micro-rede para os diferentes modos de exploração e

para as duas soluções de integração da central dimensionadas na secção 3.2.2. Na Figura B.16, presente no Anexo B.3, consta o modelo completo da rede em *Simulink* com a representação das duas soluções propostas para a integração da central, tratando-se do modelo utilizado para simular os seguintes cenários de exploração:

- **Exploração da rede no modo ilha**

Com a micro-rede em ilha, são efetuadas simulações considerando as duas soluções de integração da central e pretende-se verificar, para ambas, se o perfil de tensões obtido na rede é satisfatório.

De modo a comparar diretamente os resultados do TE obtidos para ambos os pontos de injeção da potência gerada pela central, submetem-se as respetivas simulações às mesmas condições de exploração: assume-se uma tensão à saída dos geradores síncronos fixada em 1,03 p.u. e um cenário de carga correspondente ao cenário elaborado na secção 3.2.1, o cenário de carga III. Relativamente às tomadas de exploração dos transformadores da instalação, considera-se que todos eles estão à tomada nominal, à exceção dos transformadores localizados à saída da central nas respetivas soluções, para os quais a relação de transformação é regulada para +2,5%, de modo a colmatar as perdas e respetivas quedas de tensão nos transformadores elevadores.

- **Exploração da rede no modo paralelo**

A exploração em paralelo da central com a RESP corresponde à situação de funcionamento da micro-rede do CMSM em condições normais, na qual se procura explorar a central de biomassa à sua capacidade nominal. Neste modo de exploração, torna-se importante ajustar o funcionamento do gerador síncrono da central de forma a otimizar as seguintes grandezas:

- **Tensões de serviço:** Com a presença da central e estando esta a funcionar à potência nominal, as quedas de tensão entre as SE e os pontos de receção do CMSM são significativamente atenuadas, podendo verificar-se a situação em que a queda de tensão seja no sentido CMSM - SE, aspeto constatado caso exista excesso de geração local e o fluxo de potências seja no sentido da RESP. Consequentemente, as tensões de serviço na MT da rede vão aumentar e, de forma a não comprometer a integridade da instalação, as tensões não devem atingir valores próximos das tensões máximas admissíveis, definidas pela tensão de isolamento dos equipamentos (valor de 36 kV (1,20 p.u.), para redes de 30 kV em Portugal).
- **Potência reativa gerada/consumida:** O gerador síncrono pode ser utilizado para ajustar as tensões na rede, através do controlo da potência reativa fornecida (gerador sobreexcitado) ou absorvida (gerador subexcitado). Os valores de potência reativa gerada/consumida pelo gerador estão limitados, respetivamente, pela corrente máxima de excitação e pelas condições mínimas para manter a estabilidade da marcha síncrona. Deste modo, o trânsito de potência reativa na rede está diretamente associado às condições de funcionamento do gerador e, numa perspetiva mais económica, é importante otimizar o perfil de tensões e simultaneamente minimizar a potência reativa consumida/injetada na RESP, tendo em conta as regras de faturação de energia reativa (ver secção 2.1.2).

Para as simulações do TE no modo paralelo consideram-se novamente as duas soluções de integração da central e o cenário de carga III. A geração local em ambas as soluções cobre os consumos do cenário de carga considerado, resultando num excedente de energia que é absorvido pela RESP. Com recurso às funcionalidades do *Simulink*, ajusta-se o funcionamento do gerador de forma a obter na saída para a RESP um fator de potência próximo do unitário. As relações de transformação dos transformadores mantêm-se iguais às definidas no modo ilha.

Com o intuito de comparar os resultados do TE obtidos para a rede atual e para a rede com a presença da central, são ainda realizadas simulações no modo paralelo considerando um dos cenários de carga testados na secção 3.4 (cenário de carga II) e as mesmas condições de exploração anteriormente assumidas (ver secção 2.3.3);

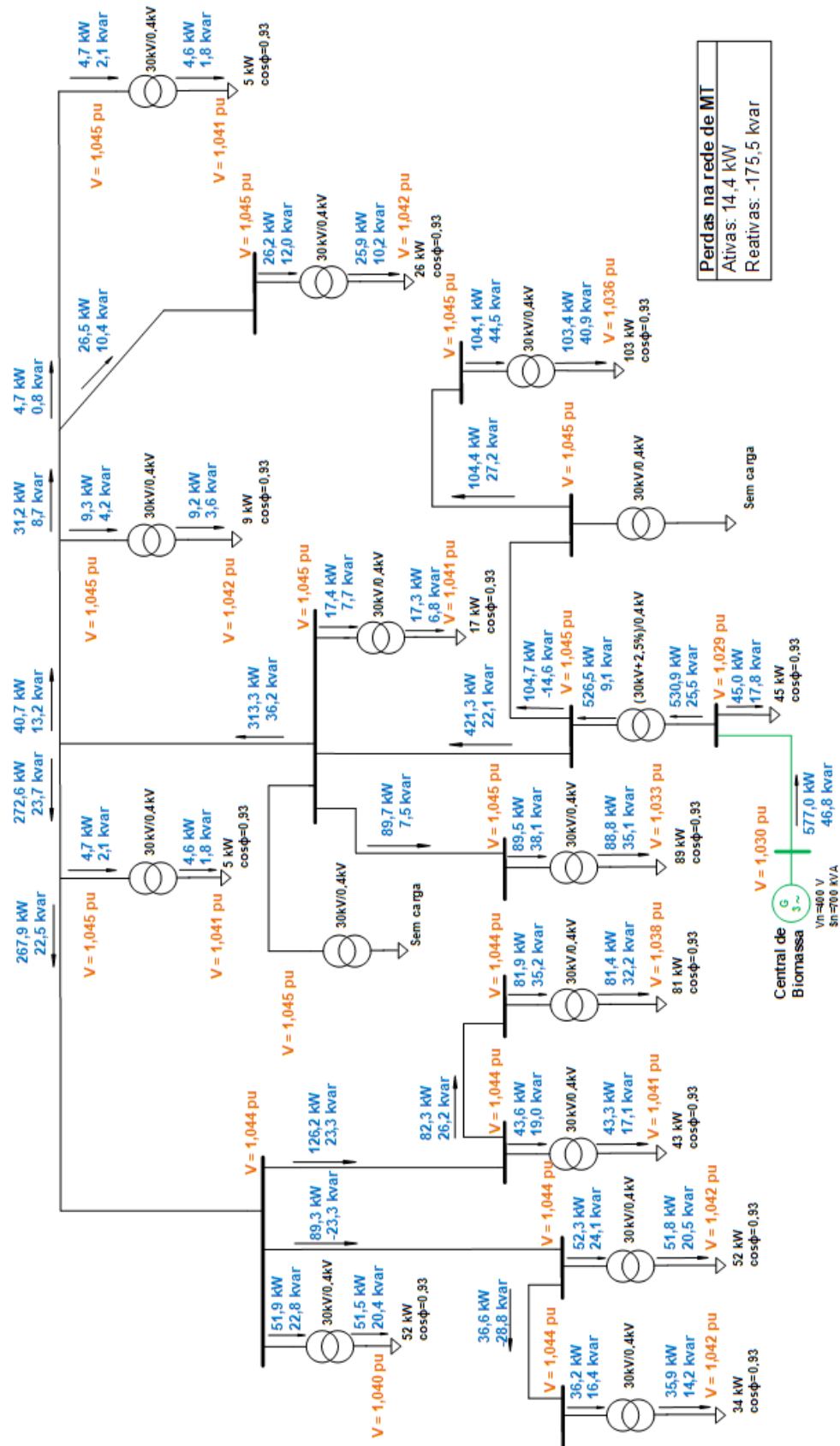
- **Interrupção de serviço da central**

Estando a rede a ser alimentada paralelamente pela central e pela RESP, pode suceder que o funcionamento da central seja interrompido por defeito interno ou para efeitos de manutenção, provocando de imediato alterações nas tensões de serviço da rede. Deste modo, procede-se também à simulação desta situação de forma a avaliar se, após o processo de transição e mantendo inalteradas as condições de exploração, as tensões da rede estabilizam em valores que satisfaçam a qualidade de serviço exigida.

Nesta simulação considera-se o cenário de carga III e apresentam-se os resultados somente para a solução A de integração da central, uma vez que a única diferença nas condições de exploração para a solução B está na relação de transformação do transformador do PT Transmissões, o que ditará resultados idênticos em ambos os casos.

Dado o número elevado de configurações e cenários de exploração possíveis para a rede, apresentam-se de forma gráfica (ver Figuras 3.1 a 3.5) somente as simulações do TE da micro-rede no modo ilha, as simulações no modo paralelo para o cenário de carga III e considerando apenas o ponto de receção atual (PT Cav. Torre) e a simulação da situação de interrupção de serviço de central para a solução A, sendo que em todas as simulações se considera a Topologia I (ver secção 2.3.2) e se assume novamente uma tensão de 1,05 p.u. à saída das Subestações. As restantes simulações de interesse para este estudo, são apresentadas sumariamente na Tabela 3.6 na secção 3.5.3, referente à análise dos resultados.

3.4.1 Resultados: Modo ilha



Perdas na rede de MT	
Ativas:	14,4 kW
Reativas:	-175,5 kvar

Figura 3.1: Simulação da rede no modo ilha (Solução: A - Injeção na BT)

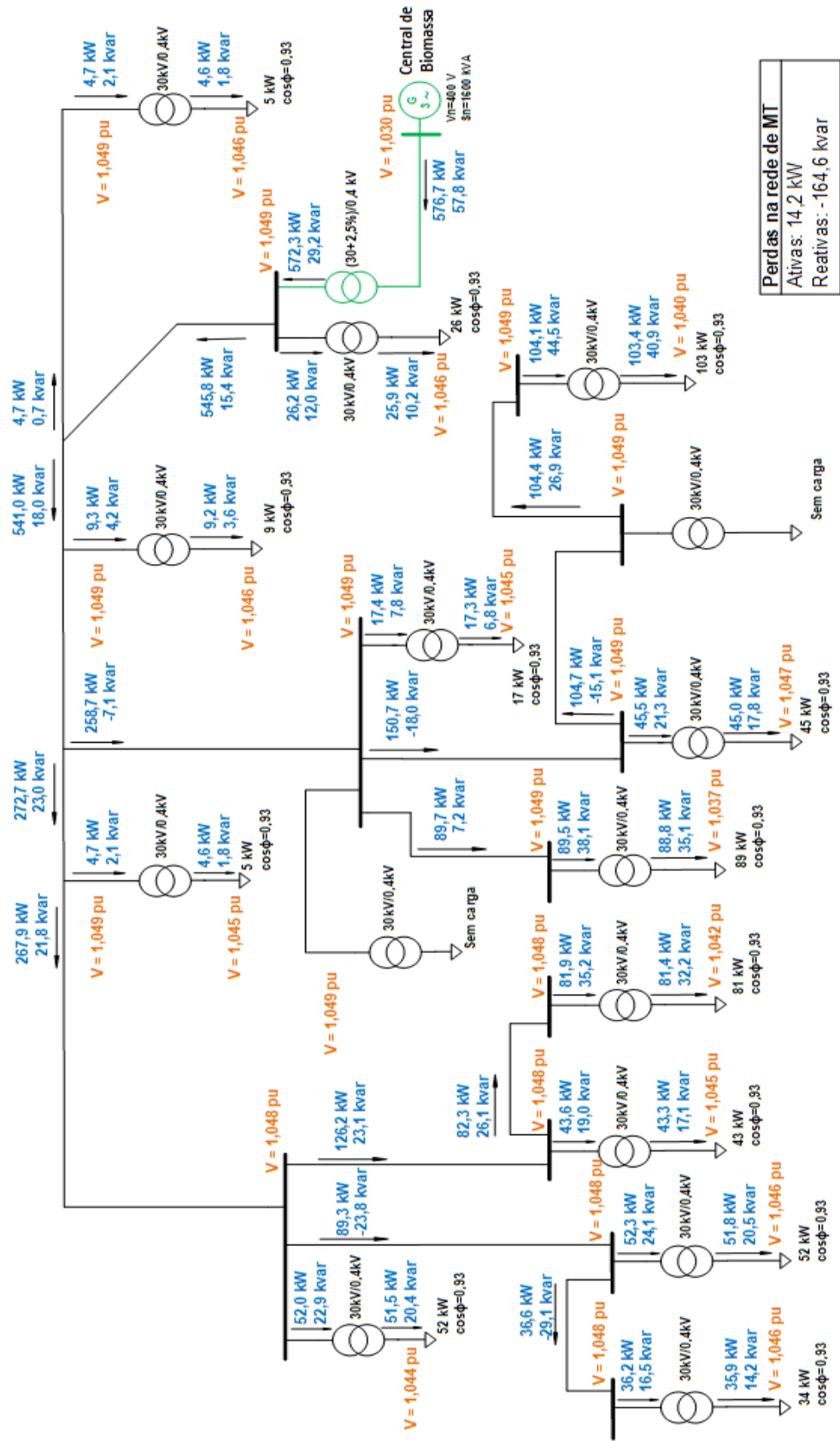


Figura 3.2: Simulação da rede no modo ilha (Solução: B - Injeção na MT)

3.4.2 Resultados: Modo paralelo

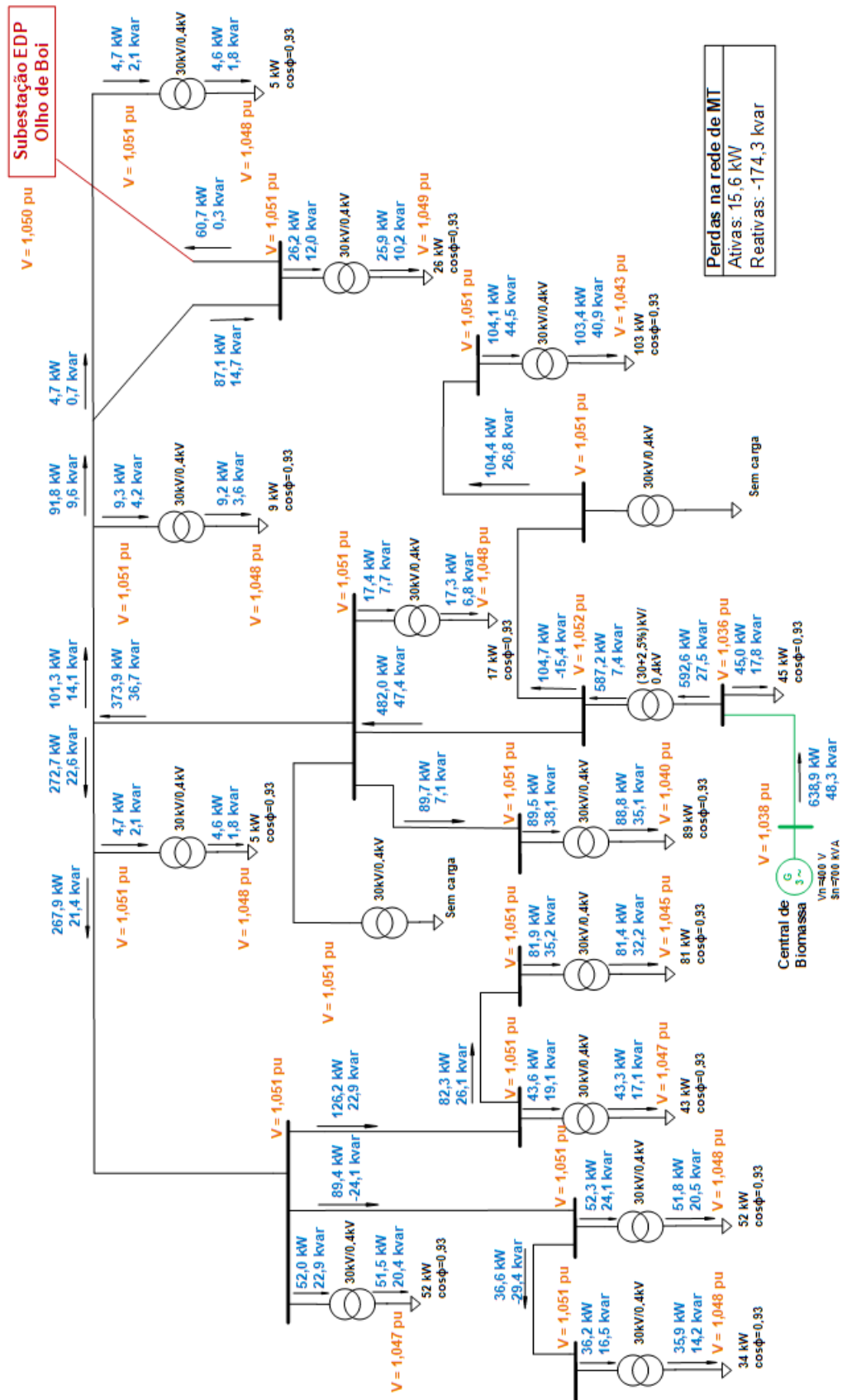


Figura 3.3: Simulação da rede no modo paralelo (Solução: A - Injeção na BT; Recepção: PT Cav. Torre)

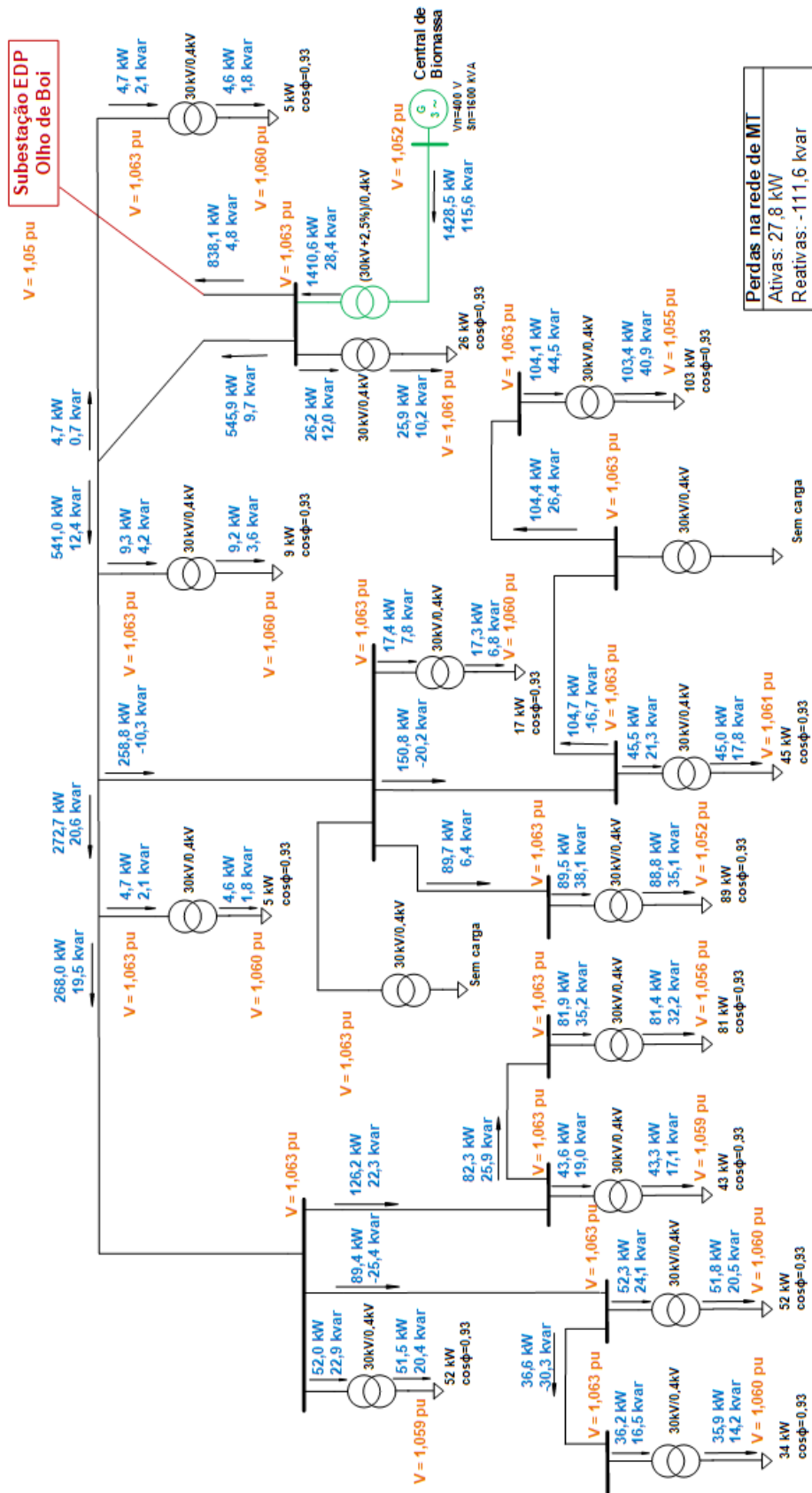


Figura 3.4: Simulação da rede no modo paralelo (Solução: B - Injeção na MT; Recepção: PT Cav. Torre)

3.4.4 Análise dos resultados

Na Tabela 3.5 apresentam-se sucintamente os principais resultados obtidos com as simulações do TE efetuadas nas secções 2.3 e 3.4, sendo visível para cada simulação os valores referentes à potência gerada pela central e consumida da RESP, às tensões de serviço e às perdas na rede.

Tabela 3.5: Resultados das simulações do TE

Modo de exploração	Cenário de carga	Solução de integração da central	Ponto de recepção (RESP)	Potência gerada (central)		Potência consumida (RESP)		Tensões de serviço		Perdas	
				kW	kvar	kW	kvar	MT (p.u.)	BT (p.u.)	kW	kvar
Atual	I	-	PT Cav. Torre	-	-	1322	358	1,02	0,99 - 1,02	17 (1,3%)	-157 (-44,0%)
			PT Correios	-	-	1321	353	1,03	1,01 - 1,03	16 (1,2%)	-163 (-46,2%)
	II	-	PT Cav. Torre	-	-	3525	1346	0,97	0,99 - 1,00	58 (1,6%)	-24 (1,8%)
			PT Correios	-	-	3513	1320	1,01	1,03 - 1,04	46 (1,3%)	-51 (-3,8%)
Paralelo	III	A - Injeção na BT	PT Cav. Torre	639	48	-61	0	1,05	1,04 - 1,05	16 (2,5%)	-174 (-360,9%)
			PT Correios	639	48	-61	0	1,05	1,04 - 1,05	15,7 (2,5%)	-174 (-362,9%)
		B - Injeção na MT	PT Cav. Torre	1429	116	-838	-5	1,06	1,05 - 1,06	28 (1,9%)	-112 (-96,2%)
			PT Correios	1428	116	-836	-2	1,06	1,05 - 1,06	30 (2,1%)	-108 (-93,3%)
	II	A - Injeção na BT	PT Cav. Torre	639	48	2879	1275	0,99	1,01 - 1,02	51 (1,4%)	-46 (-3,5%)
			PT Correios	639	48	2869	1254	1,01	1,03 - 1,05	41 (1,2%)	-68 (-5,2%)
		B - Injeção na MT	PT Cav. Torre	1428	116	2113	1305	1,00	1,02 - 1,03	74 (2,1%)	50 (3,5%)
			PT Correios	1428	116	2100	1282	1,02	1,05 - 1,06	62 (1,7%)	27 (2,0%)
Ilha	III	A - Injeção na BT	-	577	47	-	-	1,05	1,03 - 1,04	14 (2,5%)	-176 (-375,0%)
		B - Injeção na MT	-	577	58	-	-	1,05	1,04 - 1,05	14 (2,5%)	-165 (-283,8%)

Exploração no modo ilha

Atendendo aos resultados do TE obtidos para o modo de exploração em ilha (ver Figuras 3.1 e 3.2), observa-se que as tensões de serviço nas simulações de ambas as soluções de integração da central estão dentro de limites satisfatórios, registando-se valores entre 1,03 - 1,05 p.u. ao nível dos QGBT's. Havendo a possibilidade de regular a tensão através do gerador da central e da comutação das tomadas dos transformadores, garante-se uma margem de manobra importante para o ajuste das tensões de serviço da rede. Em termos de perdas, para ambas as soluções obtêm-se valores de perdas de potência ativa de cerca de 2,5% da total gerada na central e, quanto às perdas reativas, estas são novamente negativas devido ao excesso de geração de potência reativa nos ramais de MT da rede.

Naturalmente que para o cenário de carga considerado, a solução A é a que melhor se ajusta, estando o seu gerador a funcionar próximo da capacidade nominal, contrariamente à solução B para a qual o gerador é explorado a cerca de 40% da potência nominal. No entanto, caso exista um incremento significativo na ponta de carga estimada para a instalação, a solução A deixa de ser viável e o ponto de injeção da central passa a ser obrigatoriamente ao nível da MT, tal como na solução B, através de um novo transformador elevador, uma vez que a potência gerada pela central passa a exceder a capacidade dos transformadores de potências nominais superiores atualmente existentes, deixando estes de poder de servir como ponto de interligação da unidade de produção à rede de MT.

Exploração no modo paralelo

Relativamente às simulações do TE para o modo de exploração em paralelo, começa-se por analisar os resultados apresentados nas Figuras 3.3 e 3.4, referentes às simulações com o cenário de carga III. Na secção 2.3, correspondente à análise do TE para a rede atual, já se observara tensões relativamente elevadas ao nível da MT da rede (1,03 - 1,04 p.u.) para o cenário de carga I, o qual reflete consumos cerca de três vezes superiores ao III. Com a integração da central, regista-se uma subida nas tensões de serviço, consequência da geração local ultrapassar a carga da instalação, resultando na injeção do excedente na RESP e em quedas de tensão no sentido das SE. Dado que à saída das SE a tensão é fixada em 1,05 p.u., nos barramentos de MT da micro-rede têm-se tensões obrigatoriamente superiores a esse valor, tendo-se tensões de serviço superiores a 1,05 p.u. e a 1,06 p.u. para as soluções A e B de integração da central, respetivamente. Desta forma, com a integração da central terão de se aceitar tensões na MT da micro-rede superiores a 1,05 p.u., mas definindo como limite superior uma tensão de 1,10 p.u. Em termos de perdas, obtêm-se valores percentuais idênticos para as perdas ativas (2 - 3%) e verificam-se novamente perdas reativas negativas em ambas as soluções.

Na exploração da micro-rede no modo paralelo pretende-se que o fator de potência no ponto de ligação à RESP seja próximo do unitário e, para tal, ajusta-se a corrente de excitação do gerador com o intuito de regular a potência reativa gerada. Para as soluções A e B, explorando os seus geradores à potência nominal com fatores de potência de 0,994 e 0,993, respetivamente, obtêm-se nas respetivas simulações um valor de $\cos \phi$ próximo do unitário na interligação com a RESP, tendo-se uma importação/exportação de energia reativa praticamente nula. Para cenários de carga distintos, o funcionamento do gerador deverá ser ajustado de forma a satisfazer as condições de exploração referidas.

Comparando, através da Tabela 3.5, os resultados do TE entre as simulações da rede atual e da rede no modo paralelo para o cenário de carga II, visualizam-se os benefícios da integração da central. Para este cenário de carga, obtêm-se na BT da rede atual tensões próximas ou mesmo inferiores a 1 p.u., verificando-se o pior caso quando o ponto de receção é o PT Cav. Torre. Com a presença da central, além da totalidade da energia consumida deixar de provir da RESP e parte dos consumos serem satisfeitos pela geração local, o perfil de tensões é melhorado, registando-se tensões na BT superiores a 1 p.u. independentemente do ponto de receção, o que beneficia o CMSM do ponto de vista da qualidade da energia e em termos económicos com a redução da fatura energética, apesar das perdas de potência ativa subirem ligeiramente devido às correntes que percorrem os transformadores elevadores serem elevadas e resultarem em perdas superiores nos enrolamentos dos mesmos.

Interrupção de serviço da central

Na Figura 3.5 consta a simulação do TE para a situação em que o funcionamento da central é interrompido e a micro-rede passa a ser alimentada somente pela RESP. Após o processo de transição resultante da interrupção de serviço da central, visualiza-se que as tensões na rede estabilizam em 1,040 p.u. na MT e entre 1,013 - 1,038 p.u. na BT, significando um decréscimo de 0,01 p.u. nas

tensões de serviço, à exceção da tensão à entrada do QGBT do PT Transmissões onde, devido ao seu transformador servir na solução A como ponto de interligação da central à MT e estar com uma relação de transformação de 1,025 p.u., se regista uma tensão inferior aos restantes PT's, mas ainda assim superior a 1 p.u. Desta forma, conclui-se que para o cenário de carga e condições de exploração assumidas, em caso de saída de serviço da central, a rede permanece estável e o perfil de tensões mantém-se aceitável.

3.5 Correntes de curto-circuito

Com o intuito de avaliar a contribuição da central de biomassa para as correntes de defeito na rede, procede-se ao cálculo das correntes de curto-circuito máximas e das tensões pós-defeito para os modos de exploração em ilha e em paralelo da central com a RESP, aplicando-se o mesmo raciocínio e método de cálculo utilizado nas secções 2.4.1 e 2.4.2.

Nas próximas secções são analisados os valores obtidos para as correntes de curto-circuito (I''_{k3}), considerando a presença de um defeito trifásico franco em cada barramento da rede, e os perfis de tensões pós-defeito para os dois modos de exploração mencionados e para cada uma das soluções de integração da central.

3.5.1 Resultados: Modo ilha

Para o modo de exploração da micro-rede em ilha, apresentam-se nas Figuras 3.6 e 3.7 os valores de I''_{k3} obtidos para cada uma das soluções de integração da central, sendo considerada a ocorrência de defeito nos barramentos de MT e à entrada dos QGBT's de cada PT, bem como aos terminais do respetivo gerador da central.

Relativamente às tensões pós-defeito, são igualmente analisadas considerando ambas as soluções de integração da central. Tal como na secção 2.4.2, relativa à análise das tensões pós-defeito para a rede atual, simula-se a presença de um defeito na BT e na MT da rede, assumindo-se os mesmos pontos de localização de defeito, mas considerando agora que no momento pré-defeito a instalação está sujeita ao cenário de carga III. Nas Figuras 3.10 e 3.11 constam os perfis de tensões simulando a presença de defeito na BT para as soluções A e B, respetivamente, e nas Figuras 3.8 e 3.9 para defeito na MT.

Correntes de curto-circuito: Solução A

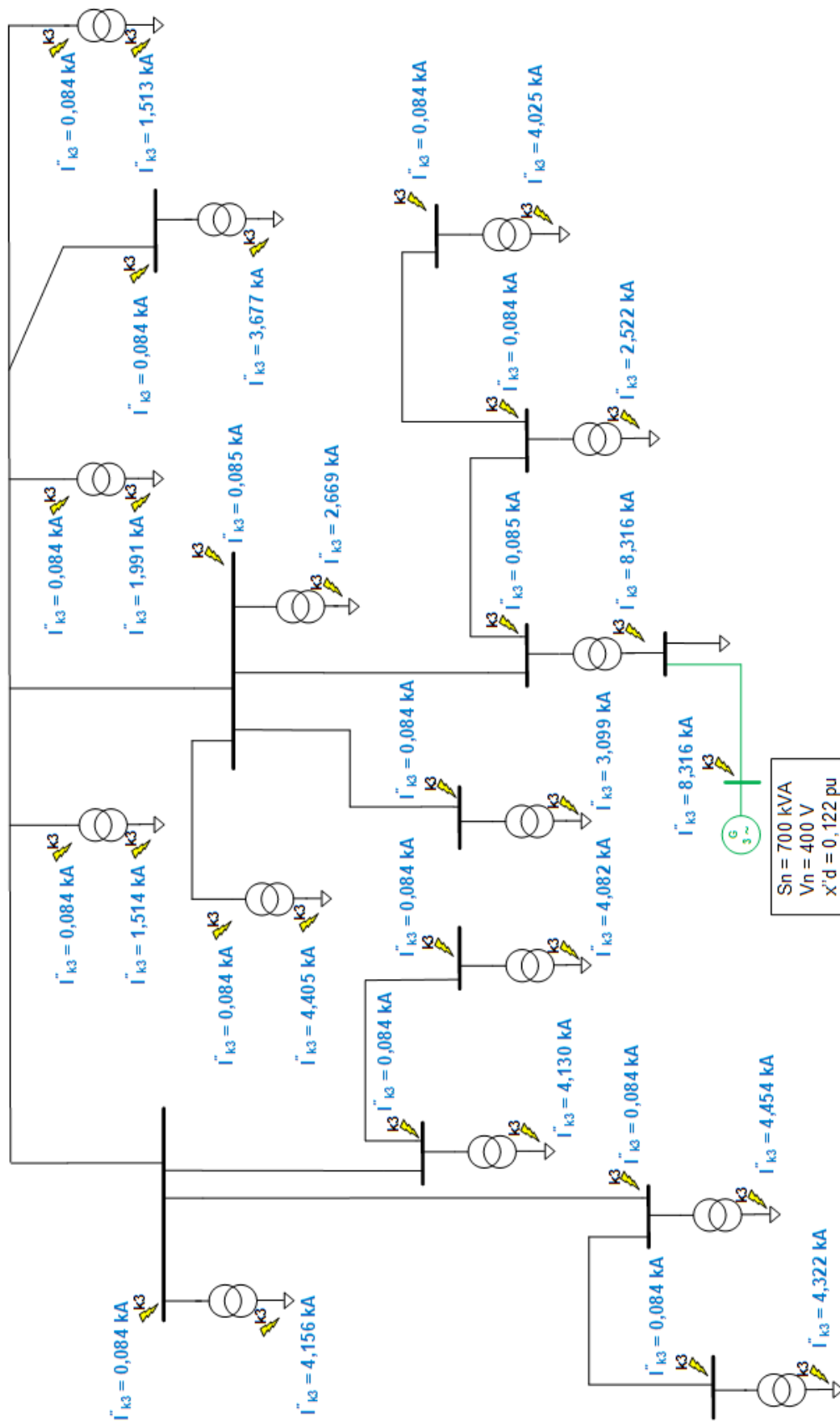


Figura 3.6: Correntes de curto-circuito (I''_{k3}) na rede em modo ilha (Solução: A - Injeção na BT)

Correntes de curto-circuito: Solução B

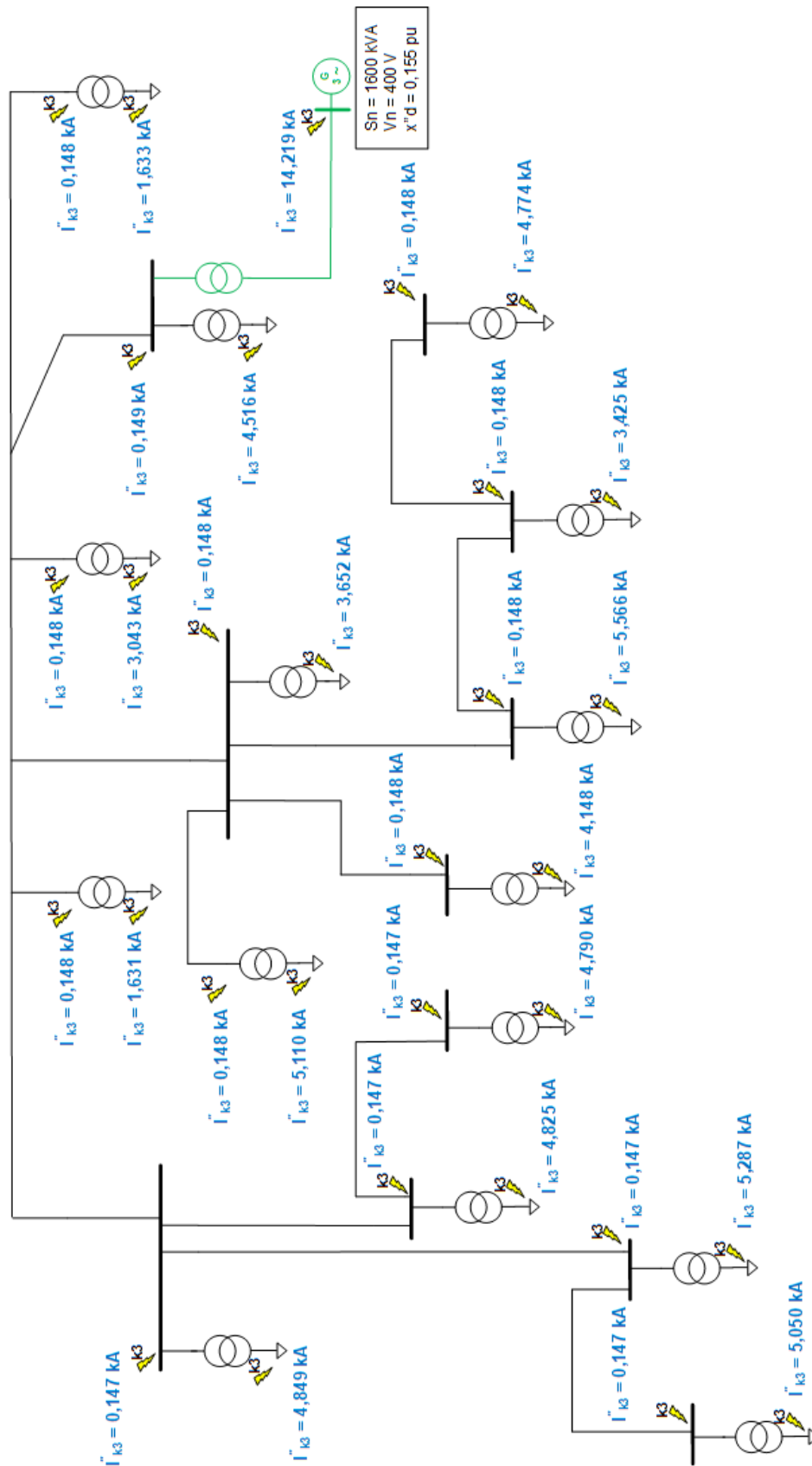


Figura 3.7: Correntes de curto-circuito (I''_{k3}) na rede em modo ilha (Solução: B - Injeção na MT)

Tensões pós- defeito - Defeito na BT

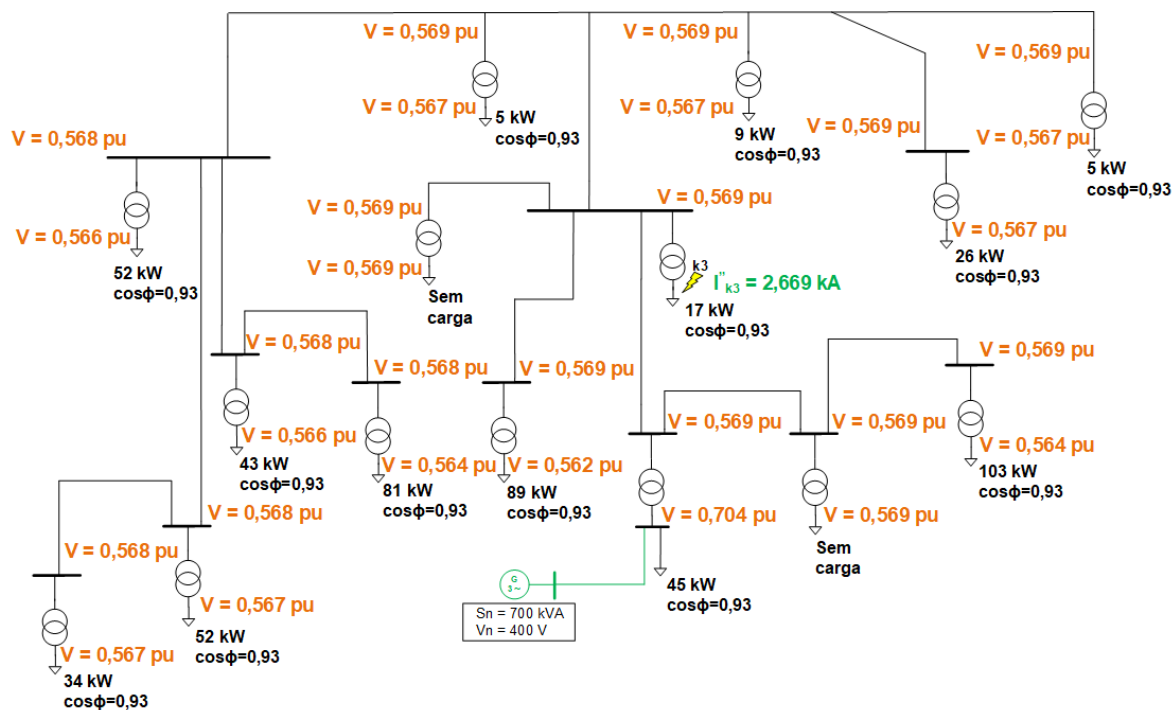


Figura 3.8: Tensões pós-defeito para c.c. na BT (Solução: A - Injeção na BT)

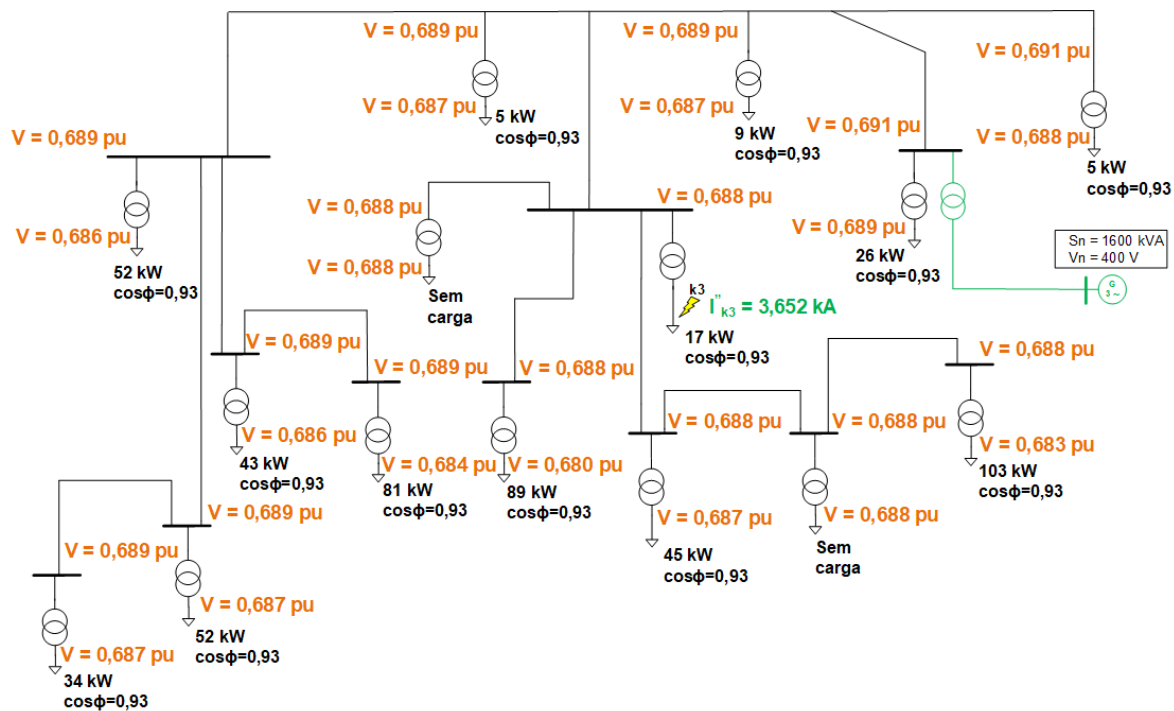


Figura 3.9: Tensões pós-defeito para c.c. na BT (Solução: B - Injeção na BT)

Tensões pós- defeito - Defeito na MT

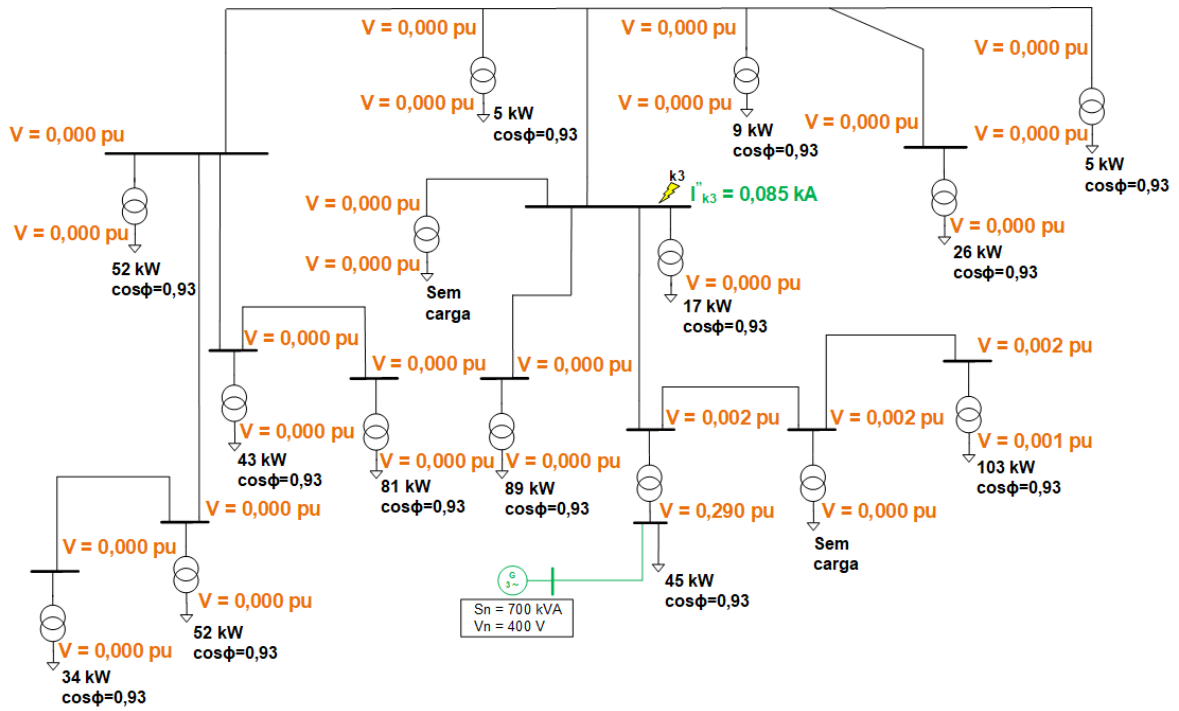


Figura 3.10: Tensões pós-defeito para c.c. na MT (Solução: A - Injeção na BT)

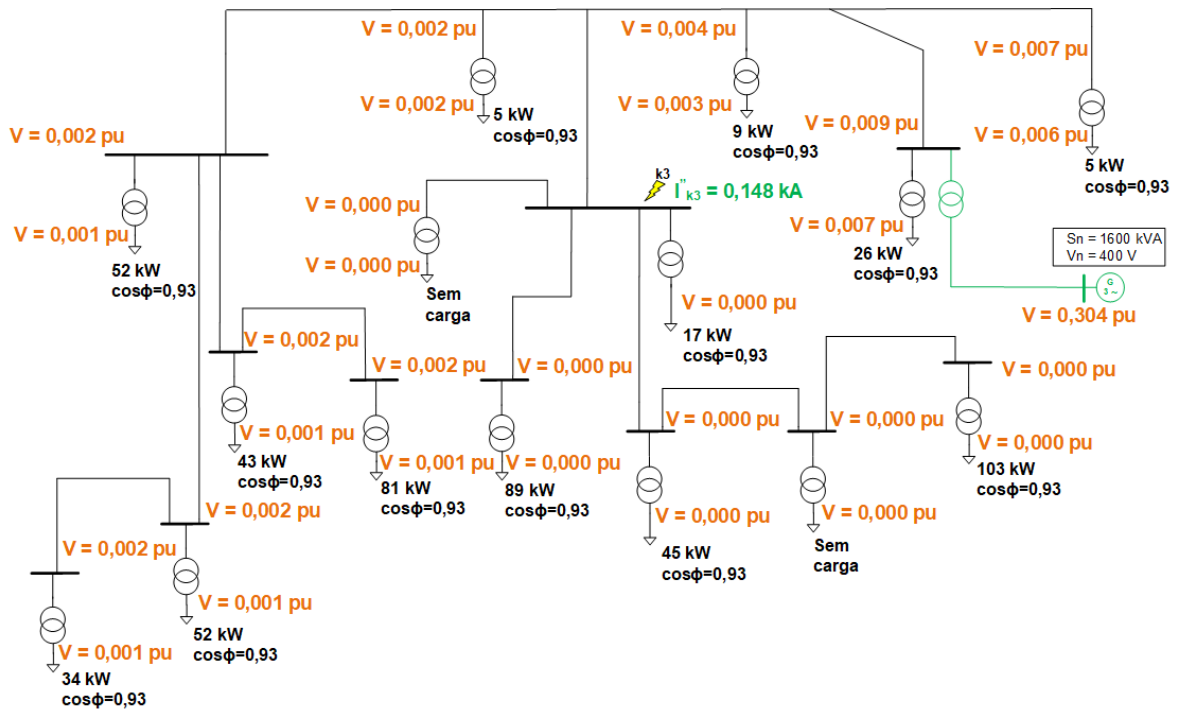


Figura 3.11: Tensões pós-defeito para c.c. na MT (Solução: B - Injeção na MT)

3.5.2 Resultados: Modo paralelo

Contrariamente ao modo atual de exploração da rede, no modo paralelo existem duas fontes alimentadoras de curto-circuitos e as correntes de defeito, face à rede atual, aumentam. Este aspeto é justificado pela presença da central, a qual contribui para o aumento das potências de curto-circuito na instalação e, conseqüentemente, para o aumento das correntes de defeito, sendo os valores de I''_{k3} determinados pelas contribuições da RESP e da central para as correntes de curto-circuito. Os valores de I''_{k3} calculados no modo paralelo não são apresentados de forma gráfica, sendo apenas exibidos na Tabela 3.6, na secção 3.5.3 relativa à análise de resultados, uma vez que os valores de I''_{k3} já são apresentados graficamente para a rede atual (ver secção 2.4) e para a rede no modo ilha (ver secção 3.5.1), onde são visíveis as contribuições individuais da RESP e da central para as correntes de curto-circuito, as quais somadas definem no modo de exploração em paralelo os valores de I''_{k3} para defeitos na MT.

No que toca às tensões pós-defeito, constam nas Figuras 3.12 e 3.13 os perfis de tensões obtidos após a ocorrência de defeito na BT, considerando ambas as soluções de integração da central e o cenário de carga III no momento pré-defeito. Para defeito na MT, não existe a necessidade de exibir graficamente os resultados, uma vez que tanto para a rede atual (ver secção 2.16), como no modo ilha, se registam tensões praticamente nulas, dando para concluir que no modo paralelo sucederá situação idêntica.

Tensões pós-defeito - Defeito na BT

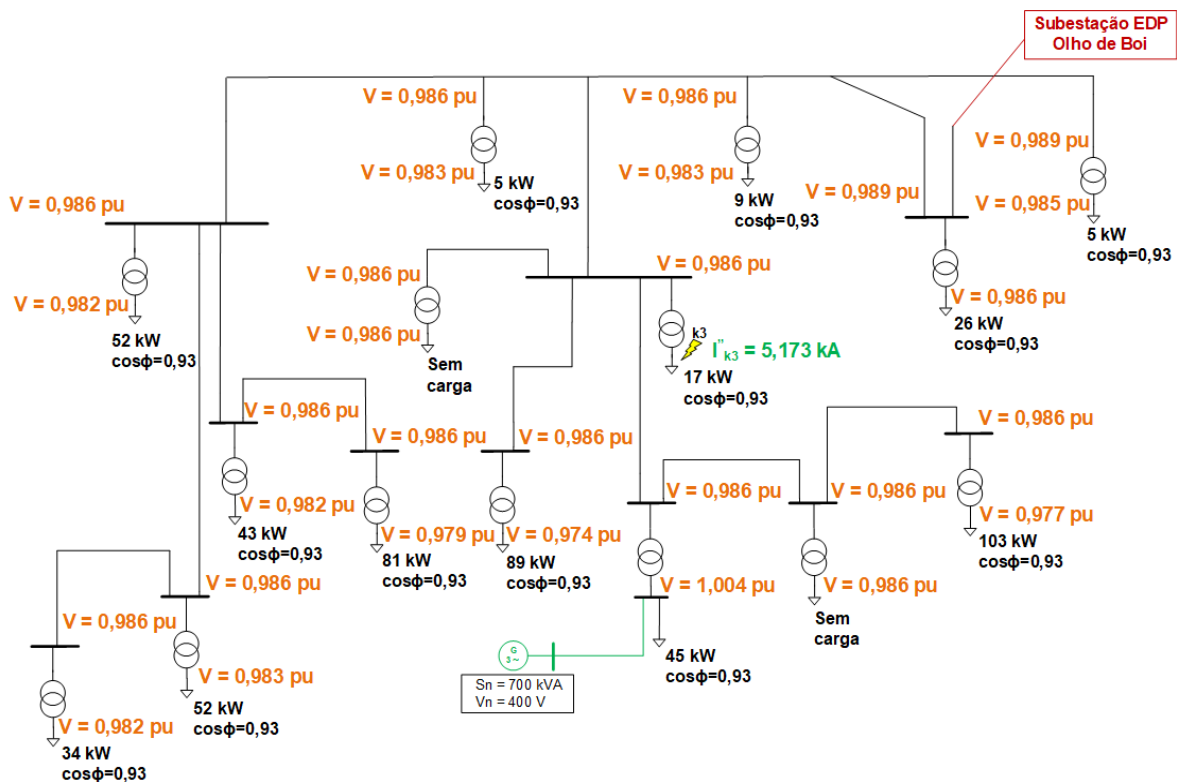


Figura 3.12: Tensões pós-defeito para c.c. na BT (Solução: A - Injeção na BT; Recepção: PT Cav. Torre)

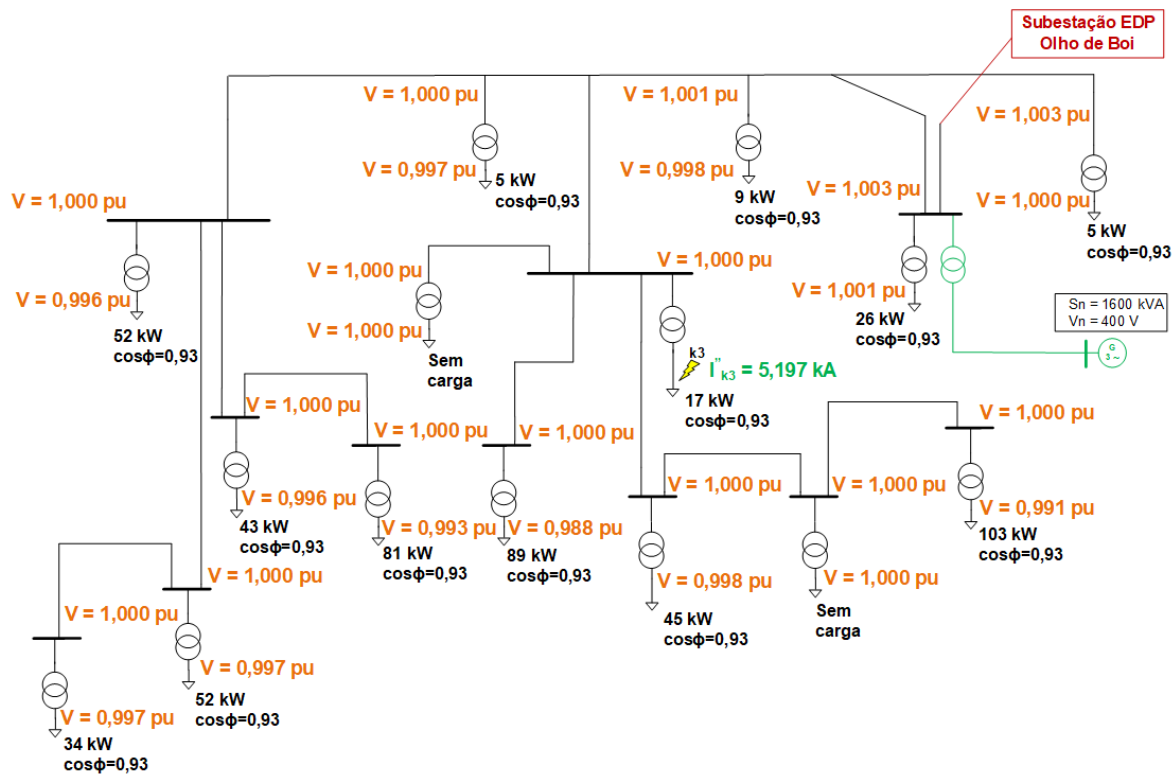


Figura 3.13: Tensões pós-defeito para c.c. na BT (Solução: B - Injeção na MT; Recepção: PT Cav. Torre)

3.5.3 Análise de resultados

Correntes de curto-circuito

Os resultados obtidos nas secções 2.4 e 3.5, relativos às correntes de curto-circuito (I''_{k3}) máximas registadas na rede para os diferentes modos de exploração, pontos de recepção da RESP e soluções de integração da central, constam na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Resultados das correntes de curto-circuito

Modo de exploração	Solução de integração da central	Ponto de recepção (RESP)	Correntes de curto-circuito (I''_{k3})		
			MT (kA)	BT (kA)	Terminais do gerador (kA)
Atual	-	PT Cav. Torre	0,80 - 0,97	1,81 - 17,81	-
	-	PT Correios	1,06 - 1,30	1,83 - 18,56	-
Paralelo	A - Injeção na BT	PT Cav. Torre	0,89 - 1,05	1,84 - 25,95	26,12
		PT Correios	1,11 - 1,38	1,85 - 26,71	26,88
	B - Injeção na MT	PT Cav. Torre	0,95 - 1,12	1,85 - 18,49	39,21
		PT Correios	1,18 - 1,44	1,86 - 19,22	40,4
Ilha	A - Injeção na BT	-	0,08	1,51 - 4,45	8,32
	B - Injeção na MT	-	0,15	1,63 - 5,57	14,22

Estando a rede a ser explorada no modo ilha, a central de biomassa é a única fonte alimentadora de correntes de curto-circuito. Caso se considere a solução A de integração da central, obtém-se nos barramentos de MT uma potência de curto-circuito máxima de cerca de 4 MVA, o que corresponde a uma corrente próxima de 80 A (ver Figura 3.6) a um nível de tensão de 30 kV. Independentemente

da localização do defeito, a variação das correntes de curto-circuito é reduzida devido ao facto de a impedância dos ramais de MT ser desprezável, sendo os valores de I''_{k3} para defeitos na MT essencialmente limitados pela reatância subtransitória (X''_d) do gerador síncrono e pela impedância do transformador elevador. Para a solução B, a potência de curto-circuito registada nos barramentos da rede é próxima de 7,5 MVA, o que equivale a valores de I''_{k3} próximos de 150 A (ver Figura 3.7) na MT.

Para defeitos na BT, obtêm-se correntes de 1,5 kA a 5,6 kA para ambas as soluções, sendo estas grandemente condicionadas pelas impedâncias dos transformadores. Aos terminais do gerador, onde I''_{k3} é somente limitado pelo valor de X''_d do gerador, calculam-se correntes máximas de 8,3 kA e 14,2 kA para os geradores de 700 kVA (solução A) e 1600 kVA (solução B), respetivamente.

Na exploração da micro-rede no modo paralelo, registam-se as correntes de curto-circuito mais críticas da instalação, uma vez que em caso de defeito existe a contribuição da RESP e da central para a corrente de curto-circuito. Tal como se constatou pela análise dos valores de I''_{k3} para a rede em ilha e pelos resultados apresentados na Tabela 3.6, a contribuição da central para curto-circuitos em relação à RESP é pouco significativa, levando a que as correntes de curto-circuito máximas, face à rede atual, aumentem em apenas cerca de 80 - 150 A para defeitos na MT. Para defeitos na BT, como já havia sido constatado para o modo atual de exploração, a impedância equivalente de Thévenin vista do ponto de defeito é essencialmente definida pela impedância de curto-circuito do transformador a montante e, deste modo, os valores de I''_{k3} vão ser idênticos aos registados na rede atual, apenas sofrendo um incremento na ordem das centenas de Ampères, à exceção do lado de BT do PT Transmissões que, quando a injeção de potência da central é na BT (solução A), os valores de I''_{k3} sobem cerca de 8 - 9 kA devido à proximidade da central.

Pela análise efetuada, verifica-se que a influência da central de biomassa na magnitude das correntes de curto-circuito possíveis de circular na rede de MT é praticamente desprezável. Desta forma, não se prevê com a integração da central a necessidade de substituição dos ramais de MT existentes, uma vez que em termos de correntes máximas admissíveis, mantêm-se adequados e válidos para os novos modos de exploração da rede.

Tensões pós-defeito

Conforme os resultados apresentados nas Figuras 3.10 e 3.11, observa-se para a rede no modo ilha que, em caso de defeito na BT, as tensões caem para valores que causam perturbações no funcionamento seguro dos equipamentos da instalação. Na simulação com a solução A de integração da central, obtêm-se tensões pós-defeito de 0,6 p.u., o que corresponde a uma queda de tensão de cerca de 0,5 p.u. em relação ao momento pré-defeito. Para a solução B, registam-se tensões de 0,7 p.u. e uma queda de tensão associada próxima de 0,4 p.u. Tratam-se de valores de tensão que, durante o espaço de tempo reduzido (inferior a 80 ms) de atuação das proteções que eliminem o defeito, são toleráveis e não comprometem a segurança das cargas associadas às partes não afetadas da instalação. No caso de defeito na MT, obtêm-se tensões pós-defeito nulas, sendo resultado do facto de a corrente de

curto-circuito que circula nas simulações para as soluções A e B ser cerca de 6 kA e 11 kA, respectivamente, o que proporciona quedas de tensão extremamente elevadas aos terminais do gerador e nos transformadores elevadores.

Para a rede no modo paralelo, os resultados relativos aos perfis de tensão pós-defeito não divergem significativamente dos da rede atual (ver secção 2.4.2). Para defeitos na BT, pelas Figuras 3.12 e 3.13 visualizam-se tensões pós-defeito próximas de 1 p.u. para ambas as soluções de integração da central, tal como se havia registado para o modo de exploração atual (ver Figura 2.15). Para defeitos na MT, à semelhança dos outros modos de exploração, as tensões pós-defeito também serão praticamente nulas, aspeto resultante das correntes de curto-circuito provocarem quedas de tensão significativas entre as SE e os pontos de receção da rede, aos terminais do gerador da central e também no transformador elevador a montante da central, levando a que nos pontos de consumo a tensão obtida seja próxima de zero. Conclui-se que independentemente do modo de exploração, em caso de ocorrência de defeito na MT, para que as partes não afetadas da instalação não sejam comprometidas, o defeito deve ser eliminado no menor intervalo de tempo possível.

Capítulo 4

Princípios Operacionais de Automação da rede de MT

Com a integração de um sistema de automação na rede de MT do CMSM, pretende-se promover uma maior autonomia, fiabilidade e segurança na gestão da rede através da implementação de automatismos capazes de intervir rapidamente em situações de perturbação do sistema, com o intuito de repor a estabilidade da rede e contribuir para a continuidade ou minimização dos tempos de interrupção de serviço das cargas da instalação. No dimensionamento do SPCC e da respetiva filosofia de proteções e de automatismos, têm-se em conta os seguintes aspetos:

- Princípios e condicionamentos de exploração da rede;
- Requisitos de segurança e de qualidade de serviço;
- Nível de gestão automatizada da rede;
- Limitações económicas;

Os princípios e condicionamentos de exploração da rede, juntamente com os requisitos de segurança e de qualidade de serviço e o nível de gestão automatizada exigidos, vão definir as funções de automatismos e a lógica de automação a implementar. Quanto maior for a exigência relativamente aos aspetos referidos, maior se torna a complexidade do sistema e, conseqüentemente, as necessidades em termos de alterações físicas na rede e de investimento em equipamentos. Em qualquer projeto de engenharia, exige-se uma otimização da solução do ponto de vista técnico e económico, pretendendo-se que a fiabilidade e segurança da instalação seja maximizada e que o investimento seja o menor possível.

Neste Capítulo são apresentados os princípios de exploração da instalação do CMSM e os automatismos com especial interesse para integração na lógica de automação da micro-rede, sendo também propostas reestruturações na rede atual consoante o nível de complexidade do sistema de automação.

4.1 Princípios de exploração da rede

Com a inclusão de uma central de biomassa na micro-rede do CMSM, as condições de funcionamento da instalação sofrem alterações, sendo necessária uma redefinição dos princípios de exploração e dos requisitos de proteção da rede. Começa-se por apresentar na Figura 4.1 o novo esquema unifilar da micro-rede, representando-se as duas soluções de integração da central elaboradas no Capítulo 3.

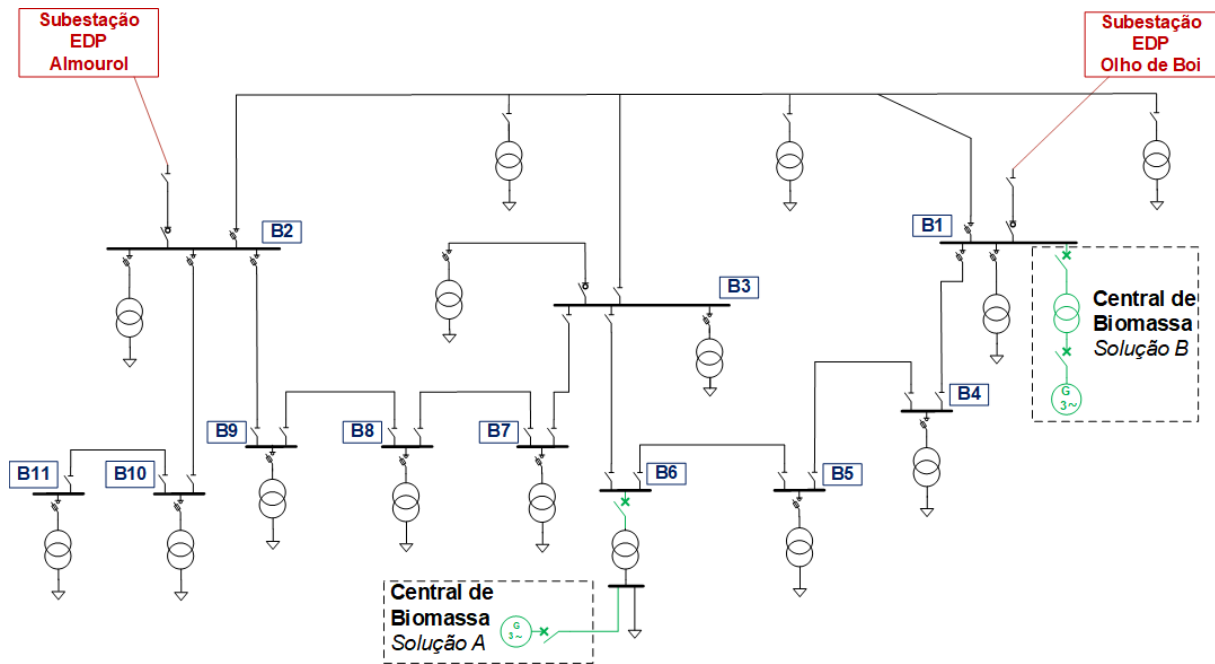


Figura 4.1: Esquema unifilar da micro-rede do CMSM

4.1.1 Condicionamentos gerais de exploração

Com base no reconhecimento da rede atual e no estudo relativamente à integração de uma central de biomassa na instalação, efetuados respetivamente nos Capítulos 2 e 3, verificam-se os seguintes condicionamentos gerais de exploração na micro-rede do CMSM :

- **Modo de exploração:** A micro-rede é constituída por três fontes possíveis de alimentação: os dois ramais provenientes da RESP e a central de biomassa. Em condições normais, a rede é alimentada paralelamente pela RESP e pela central (ver secção 3.3). A alteração de modo de exploração sucede somente no caso de indisponibilidade de ambos os ramais da RESP, ficando a rede em ilha, ou devido à interrupção de serviço da central, voltando a instalação a ser alimentada apenas pela RESP.
- **Topologia de exploração:** Pretende-se que a topologia interna da micro-rede seja, tal como na rede atual, radial ou em anel aberto. Existindo a possibilidade de reconfigurações topológicas, é necessário salvaguardar que nenhuma operação manual ou por ação de automatismo comprometa este princípio através da criação de malhas fechadas.
- **Religações automáticas:** Os ramais de MT da micro-rede são maioritariamente subterrâneos. Ao contrário do que sucede nas linhas aéreas, a presença de defeito em cabos subterrâneos é geralmente de carácter permanente e, sendo assim, a implementação de funções de religação automática no SPCC da rede não é viável, excluindo-se este tipo de automatismo.

4.1.2 Requisitos básicos de proteção

De forma a garantir um nível mínimo de segurança e de fiabilidade na exploração da micro-rede, devem ser tidos em conta os requisitos básicos de proteção da instalação descritos nos próximos pontos.

Sincronização da central com a RESP

As alterações entre modos de exploração da micro-rede envolvem operações de interligação do gerador síncrono da central de biomassa com a RESP. Previamente à interligação entre estes dois elementos, têm de ser asseguradas as condições de sincronização: frequência do gerador e da rede iguais, a força eletromotriz do gerador e a tensão da rede com a mesma amplitude e fase e a sequência de fases do gerador coincidente com a da tensão da rede. A operação de interligação pode ser efetuada manualmente através de sincronoscópios, mas uma vez que se trata de uma instalação militar, existe todo o interesse em que a operação e o controlo da micro-rede sejam processos automatizados sem necessidade de alocar recursos humanos. Para automatizar a operação de interligação, torna-se necessária a integração de relés sincronizadores que, através da observação dos valores de frequência e tensão da rede, dão ordens para ajuste dos respetivos valores aos terminais do gerador e, posteriormente, de fecho do disjuntor de interligação.

Proteção contra curto-circuitos

Na rede atual de MT, a proteção face a sobrecorrentes e correntes de curto-circuito é garantida por celas de combinado interruptor-fusível (ver secção 2.1.1). Com a perspetiva de integração de um sistema de automação, estas celas devem ser substituídas por celas de disjuntor, nas quais a atuação dos equipamentos de corte (disjuntores) é comandada por relés de proteção digitais ou também designados por Dispositivos Eletrónicos Inteligentes (DEI's), elementos essenciais da arquitetura de um SPCC.

Atendendo às possibilidades de reconfiguração topológica e aos diferentes modos de exploração da micro-rede idealizada para o CMSM, o sentido das correntes de serviço ou de curto-circuito podem alterar em determinados ramais de MT, consoante a topologia de exploração e a localização do ponto de defeito. Para que se garanta uma coordenação seletiva das proteções de máxima intensidade de corrente, é imprescindível que aos disjuntores estejam associados DEI's que, além de atuarem perante sobrecorrentes, sejam sensíveis ao sentido da corrente, isto é, possuam a função de proteção direcional, geralmente integrada em redes em anel ou com múltiplos pontos de geração.

Proteção de *loss-of-mains*

A proteção de *loss-of-mains* é um requisito essencial para uma instalação composta por recursos energéticos distribuídos (RED's) que esteja interligada a uma rede de distribuição pública, à semelhança da micro-rede do CMSM. Neste cenário, pode suceder que parte da rede de distribuição fique desconectada da restante rede, mas alguns consumidores públicos continuem a ser alimentados por RED's

de uma instalação privada, criando-se "ilhas" dentro da rede de distribuição pública. Este evento não é de todo desejado, quer do ponto de vista da segurança das pessoas, quer em termos da qualidade de energia que chega aos consumidores. De modo a evitá-lo, no momento em que seja detetada a perda de referência da rede pública (*loss-of-mains*), micro-redes com RED's ativos têm a obrigatoriedade de se desconectar imediatamente da rede pública. No reconhecimento de *loss-of-mains* são utilizados relés com funções de proteção de ROCOF (*rate of change of frequency*) e de VS (*vector shift*) [24] que, através de variações na frequência e desvios nos argumentos das tensões, detetam este tipo de perturbação.

4.2 Automatismos

Na elaboração da lógica de automação, há que inicialmente avaliar o tipo de perturbações que podem comprometer a estabilidade da rede e entender quais os cenários de exploração onde estas poderão ter maior probabilidade de ocorrência, com o intuito de definir os automatismos que devem ser integrados e as respetivas formas de atuação na rede. A implementação de automatismos na micro-rede do CMSM proporciona uma exploração dinâmica e flexível da instalação, tornando-a capaz de dar rápida resposta a eventos que perturbem a sua estabilidade através de ações como eliminação de defeitos, deslastre de cargas, alteração do modo de exploração, conforme as fontes disponíveis, ou operações de recurso.

Os automatismos apresentados possuem especial interesse para a rede de MT do CMSM e são usualmente integradas ao nível de Subestações de Distribuição, à exceção do automatismo "Interligação Automática da Micro-rede", dimensionado especificamente para a micro-rede em estudo neste trabalho.

4.2.1 Deslastre-Reposição por Mínimo de Frequência

O automatismo de Deslastre-Reposição por Mínimo de Frequência (DF) atua localmente nas saídas de MT de Subestações de Distribuição, respondendo a perturbações globais da rede, nomeadamente ao desequilíbrio entre potências geradas e consumidas. Através do deslastre de cargas, a função DF visa repor o equilíbrio de potências e evitar a desligação de geradores síncronos e consequentes apagões gerais. No Projeto-Tipo da EDP [25], a função DF contempla dois escalões de deslastre das saídas de MT das Subestações de Distribuição, permitindo classificá-las em termos de prioridade de serviço. A reposição das saídas sucede assim que a situação esteja normalizada e segue igualmente uma sequência de prioridades de serviço, de acordo com o escalão a que estejam associadas.

A função DF é importante para, numa situação em que a micro-rede esteja no modo ilha, atuar face a desequilíbrios entre a geração da central de biomassa e o consumo da instalação, originados pela incapacidade do gerador síncrono da central em satisfazer a totalidade das cargas. Caso a micro-rede esteja interligada com a RESP, este tipo de perturbação apresenta probabilidade de ocorrência reduzida, uma vez que a RESP possui naturalmente uma maior capacidade de resposta e é menos sensível

a aumentos significativos de carga na instalação, justificado pelo facto de o estatismo equivalente de uma rede de distribuição pública ser significativamente inferior ao estatismo que caracteriza um gerador síncrono de uma UPAC. Por forma a evitar a desligação da central e um apagão geral no CMSM, torna-se necessário deslastrar conjuntos de cargas até o equilíbrio de potências ser reposto.

A implementação deste automatismo é essencial para a solução A de integração da central, na qual o gerador está dimensionado para o pico atual da instalação, significando que um aumento considerável dos consumos poderá comprometer a estabilidade do gerador estando a micro-rede em ilha, aspeto que na solução B não é tão crítico devido ao seu sobredimensionamento. De uma forma geral, os requisitos para as operações de deslastre e reposição por DF na micro-rede do CMSM são os seguintes:

• **Requisito geral para a operação de deslastre:**

Estando a micro-rede em ilha, o Deslastre por DF tem início com a ativação de uma das proteções de subfrequência ou por telecomando proveniente do gerador síncrono da central de biomassa, situação que se pode verificar por sintoma da geração local estar no limite ou sem capacidade de satisfazer a demanda da instalação. O deslastre de ramais de MT deve ser efetuado por uma ordem pré-definida, estabelecida de acordo com prioridades de serviço de certas unidades ou cargas da instalação militar. Enquanto a frequência não estiver normalizada, os deslastres de carga devem prosseguir.

• **Requisito geral para a operação de reposição:**

A reposição de ramais de MT que tenham sido previamente deslastrados apenas terá início com a interligação da micro-rede à RESP, estando a Reposição por DF inibida de atuar no modo ilha, uma vez que a reposição de cargas neste modo de exploração poderia resultar em novo desequilíbrio de potências e comprometer a estabilidade do gerador síncrono. Após a interligação à RESP, a reposição iniciar-se-á com a verificação de tensão nos barramentos diretamente a montante dos ramais previamente deslastrados e caso todas as proteções sensíveis à frequência estejam inativas, sendo a reposição efetuada de forma gradual e caso nenhuma outra função impeça esta operação. Ramais que já se encontrassem deslastrados anteriormente, não poderão ser repostos pelo automatismo.

4.2.2 Deslastre-Reposição por Tensão Zero

O automatismo de Deslastre-Reposição por Tensão Zero (DU0) responde à falta de alimentação de um barramento de AT ou MT de uma Subestação de Distribuição. Inicialmente, a função DU0 deslastra simultaneamente as saídas dependentes do barramento afetado e, após o regresso normalizado da tensão, procede à reposição em serviço das saídas de forma gradual. Os principais objetivos desta função consistem em evitar o aumento súbito da carga resultante da ligação simultânea de todos os consumos e em proteger os consumidores de uma tensão que no seu regresso possa estar fora dos limites de segurança dos equipamentos, aguardando a operação de reposição pela regulação da tensão.

Tal como a função DF, a função DU0 é essencialmente útil no modo de exploração da micro-rede em ilha. Numa situação em que ocorra um defeito num ramal a montante de um certo barramento, levando a que este e as suas saídas fiquem sem alimentação, após a eliminação do defeito e a reposição do ramal em serviço, poderá verificar-se um aumento súbito da carga devido ao regresso simultâneo dos respetivos consumos que coloque em risco a estabilidade do gerador síncrono da central e a segurança da instalação. Com a função DU0, a ocorrência deste tipo de perturbação é mitigada através do deslastre das saídas dependentes do barramento afetado e da reposição gradual das mesmas, após o regresso de tensão no barramento. Independentemente do modo de exploração da micro-rede, as operações de deslastre e reposição por DU0 devem respeitar os seguintes requisitos:

• **Requisito geral para a operação de deslastre:**

O Deslastre por DU0 é geralmente desencadeado pela ativação da proteção de mínima tensão, alimentada pelos TT's do barramento de MT. Esta operação inicia-se com uma pausa de confirmação de falta de tensão caso a tensão no barramento atinja valores inferiores ao limite mínimo estabelecido e nenhuma proteção contra curto-circuitos em saídas ligadas a este barramento se encontre ativa. A pausa de confirmação não é necessária caso o barramento tenha sido isolado por outra proteção existente a montante do mesmo. Confirmando-se a falta de tensão, as saídas sem alimentação associadas topologicamente ao barramento afetado devem ser deslastradas;

• **Requisito geral para a operação de reposição:**

Após o regresso normalizado da alimentação do barramento de MT previamente afetado, garantido por uma pausa de observação em que não existam perturbações da tensão, procede-se à Reposição por DU0 das saídas associadas a esse barramento de forma gradual, desde que outras funções, como DF, considerem que não se verificam desequilíbrios de potências ou instabilidades na frequência na rede.

4.2.3 Operação de Recurso

Este automatismo está associado ao anterior e permite, através de reconfigurações topológicas na Subestação, realimentar um barramento sem tensão através do recurso a fontes alternativas disponíveis, como um barramento vizinho, um transformador ou uma Subestação vizinha. No caso da rede de MT do CMSM, não são consideradas operações de religação automática, implicando que um ramal deslastrado por atuação de proteções de máxima intensidade necessite obrigatoriamente de intervenção humana para ser recolocado em serviço e a parte afetada da instalação possa ficar sem alimentação durante tempos consideráveis. Desta forma, as operações de recurso tornam-se ainda mais relevantes, uma vez que possibilitam a realimentação dos barramentos de MT afetados através de fontes alternativas que, no caso particular desta rede, são barramentos vizinhos interligáveis através de redundâncias (ramais) existentes. Na Figura 4.2, apresenta-se um caso prático de operação de recurso na micro-rede.

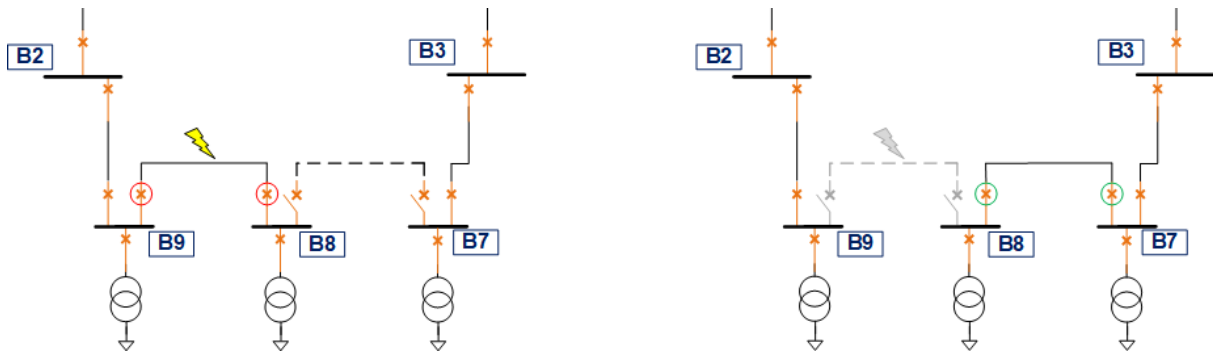


Figura 4.2: Exemplo prático de Operação de Recurso na micro-rede do CMSM

Na topologia atual de exploração, o barramento B8 é alimentado através do ramal proveniente de B9, estando o ramal entre B8 e B7 normalmente fora de serviço. Na Figura 4.2 assume-se a presença de defeito no ramal entre B9 e B8 que, após a atuação da proteção, é isolado da rede, provocando a interrupção na alimentação de B8. Com a atuação de um automatismo de Operação de Recurso, a redundância existente é aproveitada e recorre-se ao ramal entre B8 e B7 para realimentar B8, procurando assim reduzir significativamente o tempo que este barramento ficaria fora de serviço. Na micro-rede do CMSM, este automatismo deve respeitar as seguintes condições de atuação.

- **Condição 1:** O barramento de MT a realimentar estar são, não possuindo defeitos de isolamento;
- **Condição 2:** O isolamento do barramento de MT não ter sido efetuado através de uma manobra voluntária do operador da micro-rede;
- **Condição 3:** A fonte alternativa, definida pelo barramento de MT vizinho e pelo ramal que interliga ambos, encontrar-se igualmente são e em condições para alimentar o barramento afetado. Caso a fonte alternativa esteja fora de serviço por razões que obriguem a que esta não possa ser utilizada, é necessário garantir que não são efetuadas operações de ligação indevidas sobre este elemento;
- **Condição 4:** Nenhuma operação que possa comprometer a topologia radial da micro-rede;
- **Condição 5:** Nenhum outro automatismo esteja em atuação sobre o barramento afetado ou a sua fonte alternativa.

A integração de automatismos de Operação de Recurso associados aos diversos nós da rede (barramentos e ramos), permite a idealização de um automatismo de Auto-cicatrização. Este automatismo, através do reconhecimento de barramentos religáveis sem alimentação e da análise dos elementos que podem ser utilizados como fonte alternativa, realiza a gestão das Operações de Recurso na rede. Na micro-rede do CMSM apenas fará sentido considerar a implementação de Auto-cicatrização numa solução avançada em termos de automação, uma vez que o seu funcionamento exige informação constante do estado dos diversos elementos da rede, de modo a adaptar-se às diferentes topologias de exploração e reconfigurações topológicas. Na secção 4.3.3 mencionam-se as reestruturações necessárias na rede atual para a implementação deste automatismo.

4.2.4 Interligação Automática da Micro-rede

Tendo em conta a especificidade da rede de MT do CMSM, procede-se à definição de um automatismo designado como "Interligação Automática da Micro-rede (IAMR)". Esta função visa aproveitar a existência de dois pontos de interligação com a RESP, os quais estabelecem a fronteira entre o operador da rede de distribuição pública e o cliente e são denominados de PCC (*points of common coupling*). A sua atuação restringe-se a situações em que a micro-rede se desconecte da RESP de forma não intencional, isto é, por ordem das proteções associadas à abertura dos disjuntores de PCC. Com a implementação da função IAMR, têm-se os seguintes objetivos:

- Automatizar o processo de decisão do ponto de interligação (PCC) com a RESP, através da avaliação da disponibilidade das fontes de alimentação e dos elementos da rede envolvidos;
- Verificar continuamente a possibilidade de nova interligação à rede exterior, a partir do instante que a micro-rede se desconecte não intencionalmente da RESP.

De forma a detalhar o comportamento da função IAMR, procede-se à análise da Figura 4.3 onde são representadas de forma simplificada as fontes de alimentação da micro-rede.

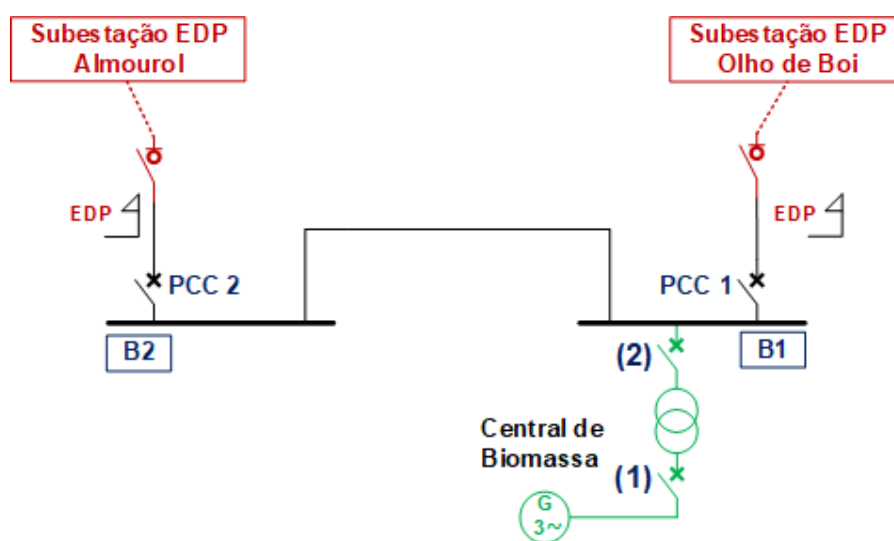


Figura 4.3: Representação simplificada das fontes de alimentação da micro-rede

Na micro-rede podem ocorrer as seguintes transições entre modos de exploração:

- **Modo atual** ↔ **Modo paralelo**: A transição entre estes modos implica a colocação em serviço ou a desligação da central, tratando-se de operações realizadas através do fecho/abertura do disjuntor (1), localizado aos terminais do gerador. A sincronização do gerador da central com a RESP é efetuada ao nível deste disjuntor - o transformador elevador à saída da central é primeiramente energizado pela RESP através do fecho do disjuntor (2), verificando-se no lado da BT do transformador a tensão

e frequência que servirão de referência para o ajuste dos parâmetros do gerador, com o intuito de satisfazer aos seus terminais as condições para a ligação síncrona;

- **Modo paralelo ↔ Modo ilha:** A passagem do modo paralelo para modo ilha implica a desconexão da RESP através da abertura de um dos disjuntores de interligação (PCC 1 ou PCC 2) ou pela abertura dos interruptores-seccionadores por acção de telecomando do operador da RESP, sendo que caso seja um destes últimos a abrir, o disjuntor de interligação deve igualmente abrir de modo a prevenir a ligação com a RESP sem verificação das condições de sincronização. Estando a micro-rede no modo ilha e confirmando-se a disponibilidade de um dos ramais exteriores, a interligação com a RESP poderá ser reestabelecida mediante o fecho do disjuntor de PCC 1 ou de PCC 2, os quais só poderão ser fechados após reunidas as condições de sincronização, uma vez que a central permanece em serviço durante esta transição de modos de exploração.

De forma a garantir que as operações de transição de modos de exploração na micro-rede ocorrem de forma segura e fiável, a atuação da função IAMR tem de satisfazer os seguintes requisitos operacionais:

- **Condição 1:** A função IAMR inicia o seu funcionamento a partir do momento que a micro-rede se desconecte não intencionalmente da RESP, através da abertura do disjuntor de PCC por atuação da respetiva proteção. Caso a desconexão se deva a uma ordem voluntária do operador, o automatismo permanece em repouso, sendo que apenas uma nova ordem do operador poderá repor a interligação;
- **Condição 2:** Confirmando-se o isolamento da micro-rede e caso a central de biomassa permaneça em serviço, é iniciada uma pausa para observação da estabilidade da rede em ilha. Se durante esta pausa verificarem-se perturbações no regime estacionário da micro-rede, repete-se novamente este processo, sendo que caso a estabilidade não seja alcançada, deverá ocorrer a desligação do gerador da central por atuação das suas proteções;
- **Condição 3:** Caso a micro-rede esteja a ser alimentada somente pela RESP e se desconecte da mesma, a instalação fica sem alimentação (*blackout*). Neste cenário, a função IAMR não necessita de pausa para observação da estabilidade da rede e tenta rapidamente verificar a possibilidade de nova interligação à RESP, sendo para tal necessário a existência de um sistema de alimentação de *backup*, como sistemas UPS ou geradores diesel, que assegure os serviços auxiliares e permita que todo o *hardware* associado ao SPCC da micro-rede se mantenha com alimentação após o *blackout* da instalação;
- **Condição 4:** Verificando-se a estabilidade da micro-rede em ilha (extinção da pausa de observação sem perturbações) ou caso esta fique em *blackout*, a função IAMR avalia a disponibilidade dos ramais da RESP e a hipótese de nova interligação. Uma vez que se pode verificar a situação em que ambos os ramais estejam em condições de ser utilizados, é necessário estabelecer à partida um critério que defina um dos ramais como prioritário, utilizando-se o outro apenas como reserva;
- **Condição 5:** Após a decisão da função IAMR quanto ao ponto de interligação e caso nenhuma outra função esteja ativa e iniba o fecho do disjuntor de PCC, inicia-se a tentativa de religação à RESP. Se

a religação for bem-sucedida, a função retorna ao estado de repouso. Em caso contrário, retorna ao processo de avaliação da possibilidade de interligação.

Na Figura 4.4 encontra-se o fluxograma representativo da sequência de ações do automatismo de IAMR.

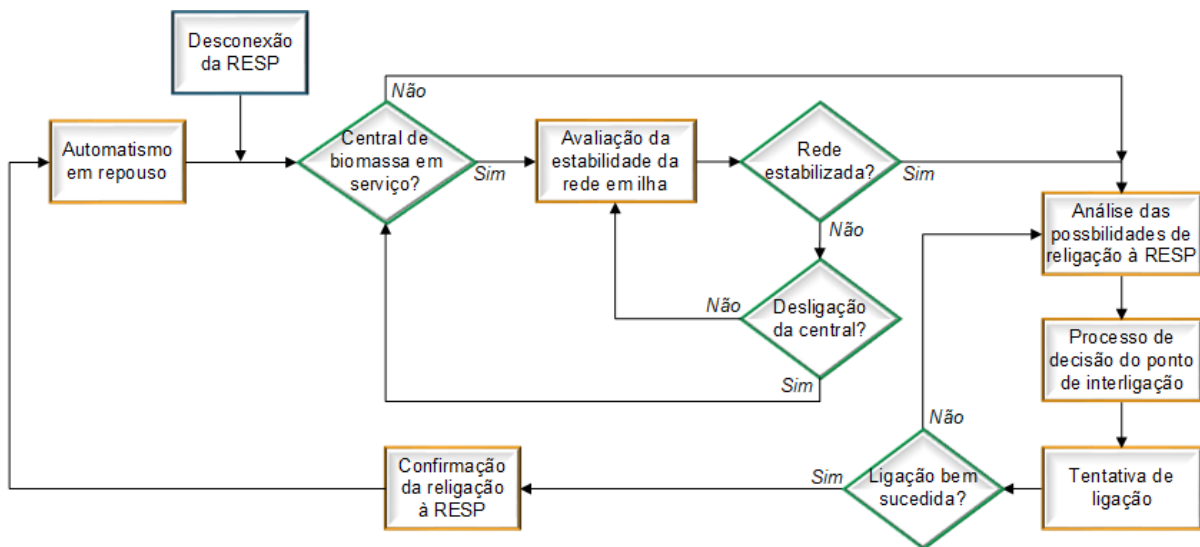


Figura 4.4: Fluxograma de funcionamento do automatismo de Interligação Automática da Micro-rede

Este automatismo requer validação por parte do operador da RESP quanto à sua exequibilidade, uma vez que poderá interferir com os seus interesses de exploração. Um dos requisitos de cumprimento obrigatório está relacionado com o facto de a topologia da rede EDP não poder em momento algum ser alterada por intervenção alheia, situação que pode ocorrer caso ambos os pontos de interligação da micro-rede à RESP estejam simultaneamente fechados. Torna-se assim necessário salvaguardar que os pontos de interligação são mutuamente exclusivos, isto é, apenas um deles pode estar ativo, garantindo-se este requisito através de uma lógica de encravamentos entre PCC 1 e PCC 2.

No Capítulo 5 procede-se à especificação do automatismo de IAMR através de Redes de Petri (RdP).

4.3 Reestruturação da rede atual

A implementação de um SPCC na micro-rede do CMSM obriga a reestruturações na rede atual de MT. Tendo em conta as limitações existentes, no cômputo geral torna-se necessário fazer alterações e aquisições ao nível de equipamento primário e secundário na rede de MT:

- **Renovação do equipamento de potência primário:** Substituição das celas de MT de interruptor-seccionador e/ou interruptor-fusível por celas de disjuntor (equipamento de corte comandável);
- **Órgãos de medição:** Transformadores de Tensão (TT's) e de Intensidade (TI's), para a medição de

tensões e de correntes nos barramentos e ramais da rede;

- **Órgãos de proteção e controlo:** Integração de DEI's para a realização de funções de proteção, aquisição de medidas, registo de oscilografias e comando dos disjuntores;
- **Rede de comunicações de dados:** Uma estrutura de comunicações que permita a transmissão dos vários tipos de informação pelos dispositivos físicos que compõem a arquitetura do SPCC.

Nas próximas secções apresentam-se três soluções com níveis crescentes de complexidade em termos de automação para a micro-rede do CMSM. Para cada uma delas são descritos os automatismos considerados e as funcionalidades garantidas, sendo referidas as respetivas reestruturações necessárias.

4.3.1 Solução básica

Com esta solução são propostas as reestruturações necessárias para garantir os requisitos básicos de proteção da micro-rede e integrar desde já uma lógica simples de automação. Procedem-se a modificações essencialmente ao nível dos barramentos de receção (*B1* e *B2*) da rede, dotando-se as respetivas entradas e saídas de celas de disjuntor, a cada qual está associado um DEI para o comando do equipamento de corte, bem como dos TI's e TT's necessários, conforme se observa na Figura 4.5.

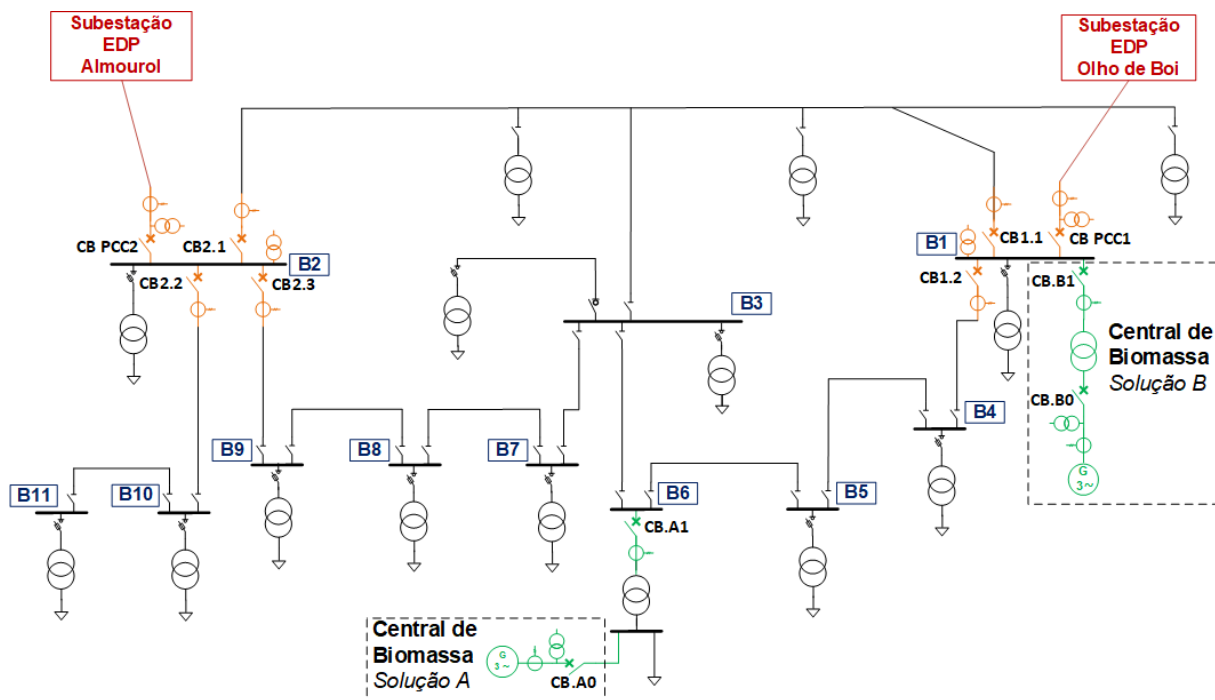


Figura 4.5: Esquema unifilar da micro-rede com as alterações referentes à solução básica

Em termos de proteção da micro-rede, garantem-se os requisitos básicos descritos na secção 4.1.2:

- **Sincronização da central com a RESP:** operação automatizada através da integração de DEI's com a função de sincronização nos pontos da micro-rede onde se poderá exigir a interligação síncrona

entre a central e a RESP, associados aos disjuntores *CB PCC1*, *CB PCC2* e *CB.A0* (ou *CB.B0*, consoante a solução de integração da central);

- **Proteção contra curto-circuitos:** de modo a garantir a seletividade de proteções para diferentes topologias de exploração da micro-rede, são integrados DEI's com a função de proteção direcional, permitindo que atuem em conformidade com o sentido da corrente. A alteração de sentido é identificada através das relações entre os argumentos das tensões e correntes, integrando-se TI's nas entradas/saídas dos barramentos e TT's no próprio barramento para monitorizar as correntes e respetivos sentidos nos diversos ramais;
- **Proteção de *loss-of-mains*:** associados aos pontos de interligação da micro-rede com a RESP, são integrados DEI's com funções de proteção de *loss-of-mains*. Ocorrendo este tipo de perturbação, os disjuntores de interligação (*CB PCC1* e *CB PCC2*) recebem ordens de disparo dos respetivos DEI's, isolando de imediato a micro-rede da RESP.

Relativamente à lógica de automação, com a integração dos órgãos de medição, proteção e controlo ao nível dos barramentos de receção, aliada a uma estrutura de comunicações que proporcione a troca de informações entre os DEI's, estão reunidos os requisitos em termos de equipamento para a implementação do automatismo de IAMR. Desta forma, na solução básica de automação garante-se com IAMR a interligação automatizada em ambos os PCC da micro-rede, considerando-se ainda a implementação dos automatismos de DF e DU0, sendo que a atuação dos mesmos será limitada, uma vez que apenas poderão efetuar operações de deslastre e reposição ao nível das entradas/saídas dos barramentos de MT reestruturados (*B1* e *B2*).

4.3.2 Solução intermédia

Nesta solução, além de serem mantidas as funcionalidades garantidas pela solução básica, são estendidas as reestruturações a um nó central da micro-rede, associado ao barramento *B3*. Estas modificações, representadas na Figura 4.6, permitem alargar a zona de atuação dos automatismos de DF e DU0 às entradas/saídas deste barramento. Esta alteração tem a vantagem de proporcionar uma gestão mais flexível da rede, uma vez que possibilita o deslastre automático de conjuntos de cargas de forma mais criteriosa, ao contrário da solução básica onde o disparo de um dos disjuntores das saídas dos barramentos de receção leva a que grande parte da instalação fique sem alimentação.

Comparando com a solução anterior, a solução intermédia requererá uma quantidade de equipamento de cerca de 1,5 vezes superior, expectando-se que a diferença de investimentos seja da mesma ordem de grandeza.

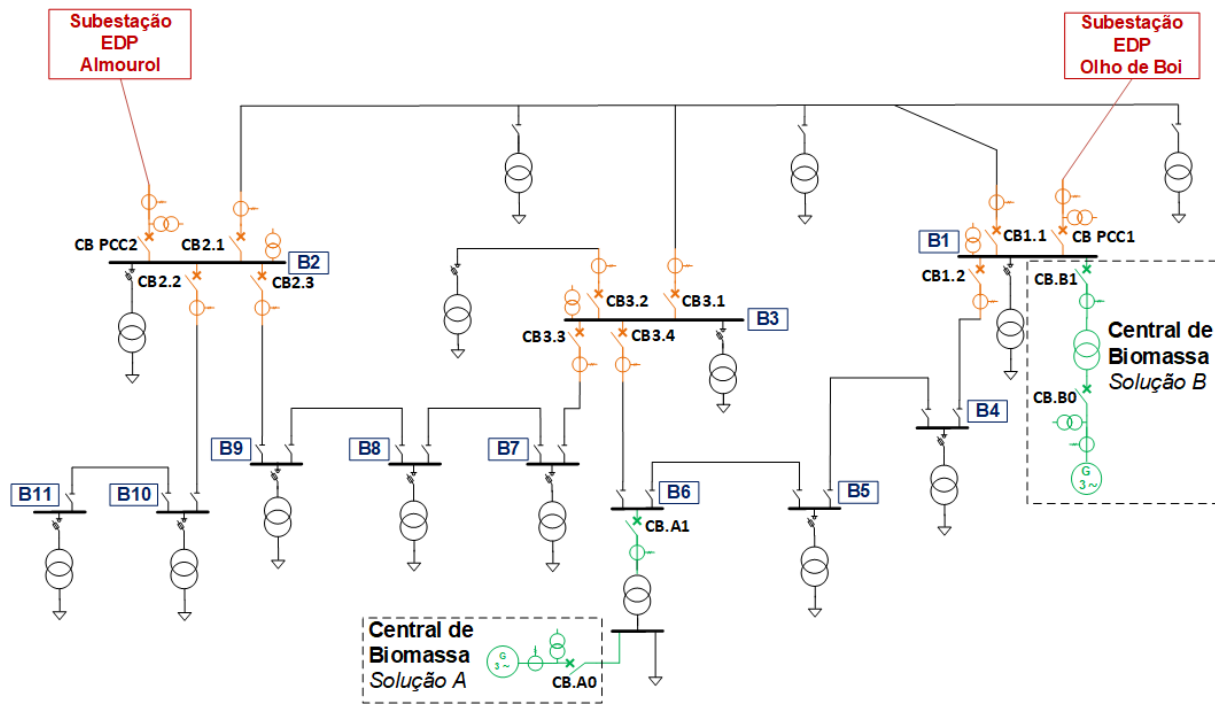


Figura 4.6: Esquema unifilar da micro-rede com as alterações referentes à solução intermédia

4.3.3 Solução avançada

Com a solução avançada pretende-se aliar as funcionalidades de proteção e automação proporcionadas pelas soluções anteriores à maximização da qualidade de serviço e segurança no fornecimento de energia elétrica a todas as partes da instalação. Com esse intuito, são efetuadas reestruturações em praticamente todos os barramentos de MT da rede através da integração de células de disjuntor e de DEI's nas respectivas entradas/saídas, conforme representado na Figura 4.7.

Comparando com as soluções anteriores, a solução avançada possibilita o dimensionamento de uma lógica de automação de complexidade superior e um nível elevado de gestão automatizada da micro-rede. Nesta solução são considerados os seguintes automatismos:

- **IAMR:** interligação automatizada à RESP em ambos os PCC's da micro-rede, sendo uma funcionalidade já assegurada com as soluções anteriores;
- **DF / DU0:** deslastres e reposições por mínimo de frequência e tensão zero ao nível de praticamente todos os ramos da micro-rede, possibilitando uma gestão de cargas com elevada flexibilidade, uma vez que é possível deslastrar individualmente cada barramento de MT ou PT da instalação;
- **Auto-cicatrização:** esta solução permite a integração de operações de recurso em todos os barramentos que compõem o anel de MT da micro-rede, possibilitando consequentemente a implementação de um automatismo de Auto-cicatrização capaz de adaptar-se à topologia de exploração, efetuar a realimentação de um barramento através de uma fonte alternativa (barramento vizinho) disponível e

assim minimizar os tempos de restauro da rede, sendo que o seu funcionamento deve satisfazer as condições referidas na secção 4.2.3.

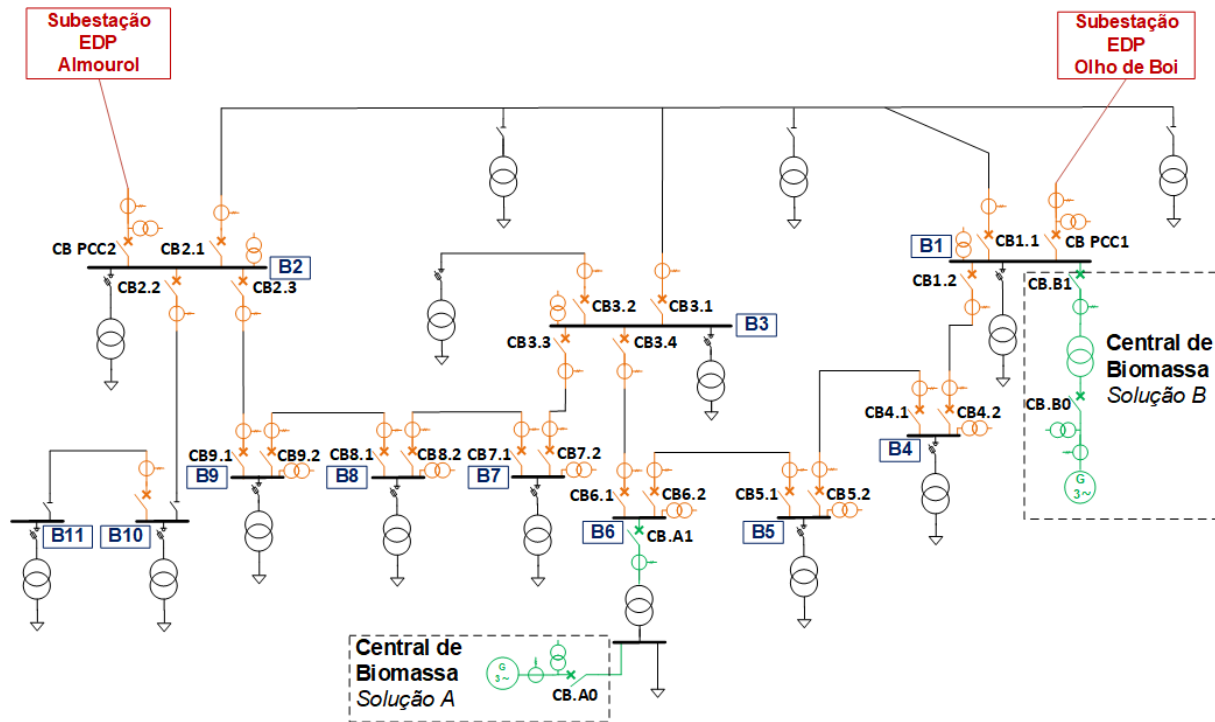


Figura 4.7: Esquema unifilar da micro-rede com as alterações referentes à solução avançada

Dentro das soluções abordadas nesta secção, a solução avançada é naturalmente a mais dispendiosa, exigindo-se 3 a 4 vezes mais equipamento que na solução básica para satisfazer a lógica de automação proposta.

Na secção 5.3 são tecidas considerações acerca da implementação dos automatismos e da arquitetura do sistema de automação na micro-rede idealizada para o CMSM.

Capítulo 5

Especificação dos Automatismos por Redes de Petri

No Capítulo 4 descreveram-se os princípios operacionais de automação e os automatismos que apresentam interesse real de aplicação ao nível da MT da micro-rede idealizada para o CMSM. Para formalizar os princípios de automação propostos, torna-se necessário traduzi-los em automatismos e autómatos modeladores que, interagindo entre si, estabelecem a lógica de automação que garante as funcionalidades pretendidas na exploração da micro-rede.

Têm-se por base as metodologias de trabalho utilizadas na Tese de Doutoramento "Automatismos Comunicantes em Subestações de Distribuição" [3], da autoria do Prof. Doutor José Luís Costa Pinto de Sá, onde são especificados e validados automatismos aqui abordados através de Redes de Petri (RdP), como o Deslastre-Reposição por Mínimo de Frequência (DF), o Deslastre-Reposição por Tensão Zero (DU0) e a Operação de Recurso, e na Dissertação de Mestrado "Auto-cicatrização de Redes de MT sobre CEI 61850"[4] do Engenheiro Gonçalo Faria, na qual é idealizado através de RdP um automatismo genérico de Auto-cicatrização aplicável a redes de distribuição de MT. Fica fora do âmbito do presente trabalho refazer o exercício de especificação e validação destes automatismos.

O presente Capítulo foca-se essencialmente no automatismo de Interligação Automática da Micro-Rede, dimensionado especificamente para a micro-rede do CMSM. Atendendo aos requisitos operacionais deste automatismo, descritos na secção 4.2.4, procede-se à sua formalização através de RdP.

5.1 Introdução às Redes de Petri

A teoria das Redes de Petri (RdP) tem a sua origem na Dissertação de Doutoramento de C. A. Petri e, desde então, tem sido desenvolvida e aplicada nas mais diversas áreas do conhecimento, como Sistemas Computacionais, Sistemas de Controlo e de Automação e Sistemas Sociais.

As RdP são uma ferramenta matemática utilizada na descrição de relações entre condições lógicas e eventos discretos, possibilitando a modelação e a análise de sistemas automáticos de controlo. Em [3, 26] é justificada a aplicação de RdP no âmbito de SPCC em Subestações, sendo aqui evidenciadas as principais vantagens:

- Especificação de sistemas discretos de elevada complexidade;

- Capacidade de representar explicitamente as dependências e independências causais em conjuntos de acontecimentos;
- Representação explícita do paralelismo no funcionamento de sistemas concorrentes;
- Interpretação gráfica que facilita a compreensão dos sistemas;
- Representação em diversos níveis de abstração sem alterar a linguagem de descrição;
- Existência de métodos formais para análise dos sistemas modelados.

No âmbito deste trabalho, as RdP apresentam especial utilidade na validação matemática de automatismos e na correta coordenação dos mesmos. Este facto é essencial para assegurar o bom funcionamento de um sistema composto por diversos automatismos com atuações em paralelismo temporal e evitar decisões potencialmente conflituais originadas pela natureza aleatória dos acontecimentos.

De seguida, apresentam-se as definições fundamentais das RdP [3, 27], necessárias para compreender os conceitos empregues neste trabalho e utilizadas na formulação e análise de automatismos, não se tendo como objetivo enunciar a teoria completa das RdP. No Anexo C, são detalhadas as propriedades dinâmicas e estruturais das RdP.

5.1.1 Estrutura das Redes de Petri

Definição 1: A estrutura de uma RdP é definida por $M = \{P, T, I, O, \mu_0\}$, em que:

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$, $m \geq 1$, é um conjunto finito de lugares;
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, $n \geq 1$, é um conjunto finito de transições;
- $I : T \times P \rightarrow N_0$, é a função de entrada ou "lugar precedente";
- $O : T \times P \rightarrow N_0$, é a função de saída ou "lugar sucessor";
- $\mu_0 : P \rightarrow N_0$, é a marcação inicial.

As funções I e O definem as ligações entre transições e lugares por intermédio de arcos orientados. Estas funções são passíveis de representação matricial: $[I]$ e $[O]$, sendo matrizes com dimensão $n \times m$ em que os elementos $I(t, P)$ e $O(t, P)$ tomam valores inteiros não negativos, associados ao peso dos arcos.

Uma marcação μ da RdP é igualmente representada na forma matricial através de um vetor coluna de dimensão m que define a marcação de todos os lugares, estando a cada lugar da RdP associado um número natural de marcas (*tokens*).

A representação gráfica da RdP é definida por um grafo bipartido orientado, à semelhança do exemplo ilustrado na Figura 5.1, onde os lugares são representados por círculos e as transições por barras. Os arcos orientados unem os círculos e as barras, estando associados às funções I e O . A marcação dos lugares é representada através de pontos no interior dos círculos representativos dos lugares. A matriz $[C] = [O] - [I]$ define a matriz de incidências da RdP.

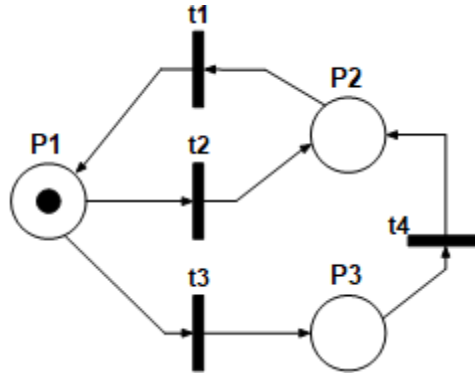


Figura 5.1: Exemplo de representação de uma Rede de Petri

5.1.2 Funcionamento das Redes de Petri

A dinâmica de funcionamento da RdP, referente à transposição de transições e à marcação de lugares, é efetuada de acordo com as seguintes definições.

Definição 2: Uma transição t diz-se sensibilizada (disparável) para a marcação μ se $\forall P_i \in P : \mu(P_i) \geq I(t, P_i), 1 \leq i \leq m$. Isto é, se todos os lugares precedentes da transição, para os quais $I(t, P_i) > 0$, possuírem uma marcação igual ou superior ao peso dos arcos incidentes.

Definição 3: A transposição de uma transição t sensibilizada para a marcação μ_k resulta numa nova marcação μ_{k+1} da RdP, definida por $\mu_{k+1} = \mu_k - I(t, \cdot) + O(t, \cdot)$. A transposição de uma transição representa a execução de duas operações indivisíveis: de cada lugar P_i são retiradas $I(t, P_i)$ marcas e a cada lugar P_i são adicionadas $O(t, P_i)$ marcas.

5.1.3 Interpretação das Redes de Petri

Uma RdP apenas apresenta interesse prático se for interpretada, isto é, se aos diversos elementos que a compõe for atribuído um significado. Deste modo, a construção de uma RdP interpretada exige previamente a interpretação da mesma, tendo em conta a especificação prevista.

Definição 4: Uma Rede de Petri interpretada consiste numa RdP $M = \{P, T, I, O, \mu_0\}$, num domínio operacional $DOP = \{D, OP, PR\}$ e em duas funções ψ e ϕ que estabelecem a relação entre a RdP (domínio de controlo) e o domínio operacional, em que:

- D é o conjunto de estados do domínio operacional;
- $OP = \{op_1, op_2, \dots, op_s\}$, é um conjunto de operadores;
- $PR = \{pr_1, pr_2, \dots, pr_s\}$, é um conjunto de predicados sobre D , definidos por $pr_j : D \rightarrow \{V, F\}$, simbolizando V e F os valores lógicos de "verdadeiro" e "falso", respetivamente;
- $\phi : P \rightarrow OP$, associa a cada lugar da RdP um operador sobre os estados operacionais;
- $\psi : T \rightarrow PR \times OP$, associa a cada transição da RdP um par (predicado, operador).

Uma RdP interpretada representa um sistema cujo estado é dado pelo par (d, μ) , em que $d \in D$ e μ é a marcação dos lugares da RdP. Estando a RdP com uma marcação μ , são ativadas as operações atribuídas pela função ϕ aos lugares que sejam marcados. Quanto às transições, estas são transponíveis se os seus lugares precedentes possuírem as marcações necessárias e se para o estado atual do domínio operacional for verificado que os predicados associados por ψ a uma mesma transição têm valor lógico verdadeiro.

5.2 Automatismo de Interligação Automática da Micro-rede (IAMR)

Nesta secção são apresentados os diversos módulos que compõe o automatismo de IAMR e executam todas as operações associadas ao funcionamento do mesmo:

- **Autómato modelador da Micro-rede:** idealizado neste trabalho com o intuito de modelar e gerar informações relativamente ao modo de exploração da micro-rede;
- **Autómato modelador de Linha:** utilizado para modelar o estado das linhas aéreas provenientes da RESP e que a interligam aos barramentos de receção da micro-rede;
- **Autómato modelador de Barramento:** utilizado para modelar o estado dos barramentos de receção da micro-rede;
- **Automatismo de Operação de Recurso:** integrado no automatismo de IAMR para avaliar a disponibilidade dos elementos envolvidos na interligação (linhas e barramentos) e tomar a decisão relativamente ao PCC a utilizar na religação à RESP;
- **Automatismo de Gestão da Interligação:** este módulo é criado com o intuito de monitorizar continuamente o estado da micro-rede e gerir as operações de recurso associadas às tentativas de interligação à RESP.

Na especificação e validação formal destes automatismos, utiliza-se o *software* TINA 3.4.4 do LAAS-CNRS (Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes). Este *software* possui um conjunto de ferramentas que permite analisar as propriedades dinâmicas e estruturais das RdP elaboradas:

- **Reachability analysis:** Efetua a verificação das propriedades fundamentais das RdP - limitação, vivacidade e conservação;
- **Structural analysis:** Efetua a análise estrutural da RdP através da verificação de invariantes de lugares e transições;
- **Stepper simulator:** Permite simular a evolução da RdP e depurar eventuais erros estruturais, como deadlocks ou transições não disparáveis.

Na Figura 5.2 apresenta-se a interface gráfica do *software* TINA 3.4.4.

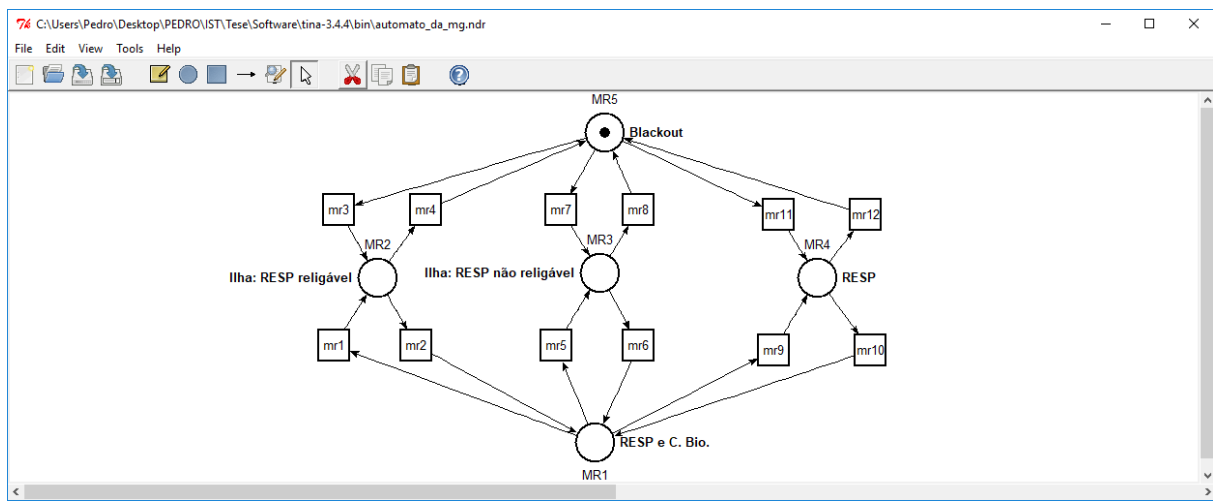


Figura 5.2: Interface gráfica do *software* TINA 3.4.4

5.2.1 Autómatos modeladores

De acordo com os princípios operacionais enunciados para o automatismo de IAMR, é determinante para o seu funcionamento ter informação contínua do modo de exploração da micro-rede e dos estados em que se encontram os barramentos de receção e as respetivas linhas de chegada da RESP, bem como da sequência de ações que conduz estes elementos a determinado estado.

Com o intuito de modelar os diversos estados dos elementos mencionados e as sequências de eventos que desencadeiam as alterações de estados, são utilizados autómatos modeladores.

Autómato modelador da Micro-rede

Atendendo aos modos de exploração e à especificidade da micro-rede do CMSM, torna-se necessária uma modelação que represente os diferentes estados e transições que caracterizam a sua dinâmica de funcionamento. Na Figura 5.3 apresenta-se a RdP interpretada do autómato modelador da micro-rede, constando na Tabela 5.1 a interpretação dos respetivos lugares e transições.

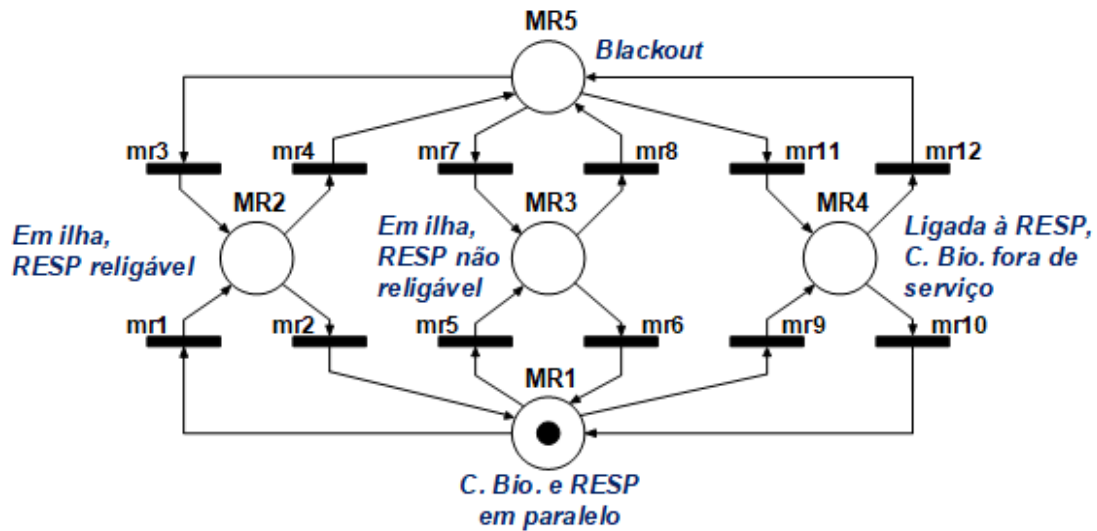


Figura 5.3: Rede de Petri interpretada do autômato modelador da Micro-rede

Tabela 5.1: Interpretação da RdP do autômato modelador da Micro-rede

Interpretação dos Lugares	
MR1	Micro-rede alimentada em paralelo pela RESP e central de biomassa
MR2	Micro-rede em ilha e religação à RESP não proibida
MR3	Micro-rede em ilha e religação à RESP proibida
MR4	Micro-rede alimentada pela RESP (central de biomassa fora de serviço)
MR5	Micro-rede sem alimentação (<i>blackout</i>)
Interpretação das Transições	
mr1	Desconexão da RESP por disparo do disjuntor de PCC (atuação das proteções por defeito na linha de chegada ou <i>loss-of-mains</i>)
mr2	Ligação à RESP reestabelecida com a central de biomassa em serviço
mr3	Reposição da central de biomassa em serviço, tendo a desconexão prévia da RESP sido provocada pela atuação das proteções
mr4	Interrupção de serviço da central de biomassa, não estando proibida a religação à RESP
mr5	Desconexão da RESP e proteções em repouso (manobra voluntária do operador)
mr6	Ligação à RESP reestabelecida, obrigatoriamente por ordem do operador, com a central de biomassa em serviço
mr7	Reposição da central de biomassa em serviço, tendo a desconexão prévia da RESP sido por manobra voluntária do operador
mr8	Interrupção de serviço da central de biomassa, estando proibida a religação à RESP
mr9	Interrupção de serviço da central de biomassa, estando a micro-rede interligada à RESP
mr10	Reposição da central de biomassa em serviço, estando a micro-rede interligada à RESP
mr11	Ligação à RESP reestabelecida com a central de biomassa fora de serviço
mr12	Desconexão da RESP, por atuação das proteções ou manobra voluntária do operador

Tal como indicado na secção 3.3, a micro-rede poderá ser explorada em três modos distintos de exploração: alimentada somente pela RESP (modo atual), alimentada pela RESP e pela central de biomassa (modo paralelo) ou isolada da RESP e alimentada pela central de biomassa (modo ilha). A sequência de eventos ditará as alterações de estado da micro-rede, tornando-se necessário discriminar as causas que podem conduzir à abertura dos disjuntores de PCC e à consequente quebra da

interligação com a RESP, no sentido de concluir se uma nova interligação pode ou não ser estabelecida por intermédio do automatismo de IAMR. Deste modo, são definidos cinco estados para representar o funcionamento da micro-rede:

- Central de biomassa e RESP interligadas, representado pelo lugar *MR1*;
- Em ilha, tendo a desconexão da RESP sido provocada por atuação das proteções face a um defeito externo à micro-rede, representado pelo lugar *MR2*;
- Em ilha, tendo a desconexão da RESP resultado de uma ordem voluntária do operador da micro-rede, representado pelo lugar *MR3*;
- Micro-rede alimentada somente pela RESP, representado pelo lugar *MR4*;
- *Blackout* - micro-rede sem qualquer fonte de alimentação ativa, representado pelo lugar *MR5*;

Autómato modelador de Linha

Em [4] efetua-se a modelação em RdP de linhas de MT pertencentes a uma rede de distribuição. No entanto, as características específicas de funcionamento das linhas de chegada da RESP que a interligam aos barramentos de receção do CMSM, obrigam a uma modelação distinta. Na Figura 5.4 e na Tabela 5.2 encontram-se, respetivamente, a RdP interpretada do autómato modelador de linha aqui utilizado e a interpretação dos lugares e transições associados.

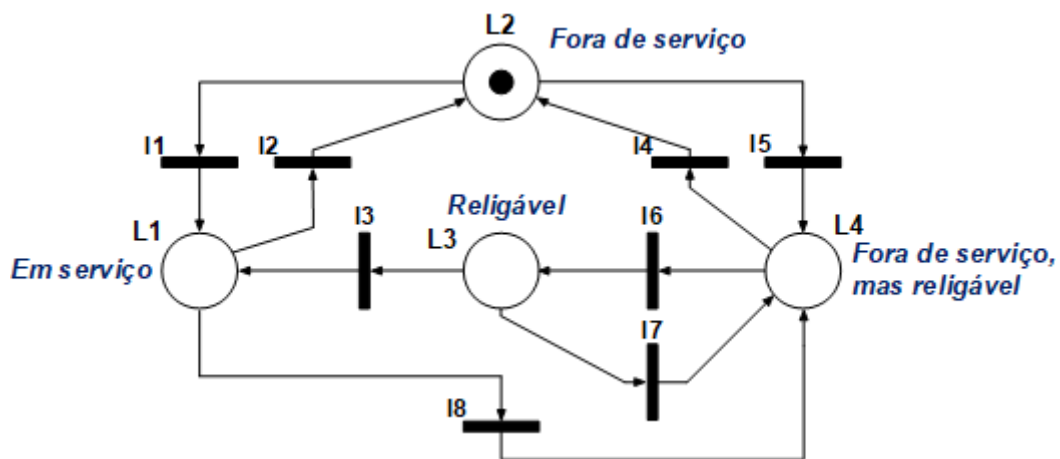


Figura 5.4: Rede de Petri interpretada do autómato modelador de Linha

Tabela 5.2: Interpretação da RdP do autômato modelador de Linha

Interpretação dos Lugares	
L1	Linha de chegada da RESP em serviço
L2	Linha de chegada da RESP fora de serviço
L3	Linha de chegada da RESP religável
L4	Linha de chegada da RESP fora de serviço, mas religável
Interpretação das Transições	
I1	Fecho do disjuntor de PCC
I2	Abertura do disjuntor de PCC sem ativação das proteções, isto é, por ação voluntária (telecomando ou por ordem do operador)
I3	Linha de chegada da RESP com tensão e fecho do disjuntor de PCC
I4	Linha de chegada da RESP descomissionada ou ligada à terra (impossibilitada de ser ligada)
I5	Linha de chegada da RESP não se encontra descomissionada ou ligada à terra e a operação prévia de abertura do disjuntor de PCC não foi voluntária
I6	Disjuntor de PCC aberto e tensão normalizada no lado da RESP
I7	Disjuntor de PCC aberto e linha de chegada da RESP com tensão zero
I8	Abertura do disjuntor de PCC por atuação das proteções

As linhas de chegada da RESP, quando conectadas aos barramentos de recepção da micro-rede, são assumidas como estando em serviço (lugar *L1*). Ocorrendo a abertura do disjuntor de PCC associado, sucede-se a desconexão da RESP e a linha passa a ser vista pelo automatismo como estando fora de serviço, com ou sem possibilidade de religação, sendo novamente necessária a discriminação das ações que conduziram à abertura do disjuntor de PCC:

- Por ordem voluntária, passando a linha a estar fora de serviço sem possibilidade de religação (lugar *L2*). Independentemente de posteriormente verificar-se tensão normalizada no lado da RESP, o disjuntor de PCC da respetiva linha não poderá ser fechado por automatismo;
- Por atuação das proteções, ficando a linha fora de serviço, mas religável (lugar *L4*), sendo que apenas poderá ser recolocada em serviço por automatismo assim que se verifique o regresso de tensão normalizada no lado da RESP e a linha seja efetivamente classificada como religável (lugar *L3*).

Autômato modelador de Barramento

A especificação do autômato modelador de barramento de MT através de RdP, no âmbito de Subestações de Distribuição, encontra-se apresentado em [3]. Atendendo às características específicas de exploração dos barramentos de MT de recepção da rede do CMSM, requer-se apenas uma adaptação da RdP original ao nível dos predicados lógicos das transições associadas às alterações de estado do barramento, não sendo necessária qualquer modificação em termos estruturais.

Na Figura 5.5 consta a RdP interpretada do autômato modelador de barramento, estruturalmente idêntica à RdP reduzida deste autômato apresentada em [3]. Na Tabela 5.3 encontra-se a interpretação dos respetivos lugares e transições.

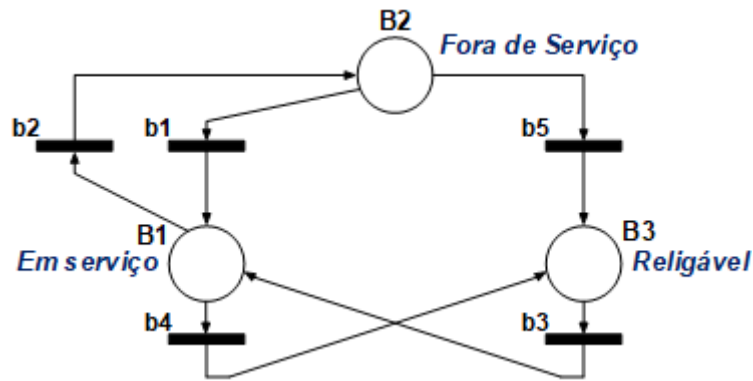


Figura 5.5: Rede de Petri interpretada do autômato modelador de Barramento

Tabela 5.3: Interpretação da RdP do autômato modelador de Barramento

Interpretação dos Lugares	
B1	Barramento em serviço
B2	Barramento fora de serviço
B3	Barramento religável
Interpretação das Transições	
b1	Reposição da tensão no barramento (por ordem do operador)
b2	Isolamento do barramento pelo disparo das proteções associadas à(s) entrada(s) do mesmo ou por ordem voluntária do operador, não podendo ser ressalvado como religável
b3	Reposição da tensão no barramento (por ação de automatismo ou ordem voluntária do operador)
b4	Barramento com tensão zero, provocado por defeito externo (disparo de proteção a montante do mesmo) ou por atuação do relé de mínimo de tensão
b5	Barramento com tensão zero, mas classificado como religável pelo operador

Os barramentos de recepção encontram-se em serviço sempre que se verifique nos mesmos a presença de tensão (lugar *B1*). A alteração de estado implica a interrupção na alimentação do(s) barramento(s), detetada pela falta de tensão, podendo esta ocorrência dever-se a situações distintas:

- O barramento é isolado pela atuação das proteções associadas aos disjuntores das entradas de alimentação do mesmo, sendo que estas não atuam como reserva (nenhuma proteção das saídas do barramento se encontra ativa). Isto poderá significar a presença de um defeito interno no barramento e, à semelhança do isolamento do barramento por ordem voluntária do operador, implica que fique fora de serviço e não possa ser classificado como religável (lugar *B2*);
- O barramento fica sem tensão devido à existência de um defeito externo, confirmado pela atuação de proteções a montante do mesmo, ou pela atuação do relé de mínimo de tensão. Neste caso, o barramento é ressalvado como são e em condições de ser religado (lugar *B3*).

5.2.2 Automatismo de Operação de Recurso

O Automatismo de Operação de Recurso (AOR) efetua as verificações necessárias relativamente ao estado dos elementos envolvidos na interligação à RESP e as operações de fecho dos disjuntores de

PCC, assim estejam reunidas as condições exigidas. O AOR começa por verificar o estado das duas linhas de chegada da RESP e dos dois barramentos de receção da micro-rede e, confirmando-se a disponibilidade de um dos pontos de interligação através da confirmação do bom estado da linha da RESP e do barramento de receção envolvidos, ordena o fecho do respetivo disjuntor de PCC.

Interpretação da Rede de Petri

Tendo por base o AOR genérico apresentado em [3], procede-se à especificação de um novo AOR adaptado à topologia da rede de MT do CMSM e capaz de efetuar as operações de recurso pretendidas com o automatismo de IAMR. De seguida, apresenta-se a respetiva RdP, sendo esta composta por dois módulos utilizados para distinguir os dois cenários distintos em que podem ocorrer operações de recurso pela atuação de IAMR na micro-rede:

- **Módulo A:** operações de recurso para interligação à RESP, estando a micro-rede em ilha;
- **Módulo B:** operações de recurso para interligação à RESP, estando a micro-rede em *blackout*;

Nas Figuras 5.7 e 5.8 representam-se as RdP de AOR referentes aos módulos A e B, respetivamente. Nota para o facto de os lugares a tracejado serem exteriores a AOR e representarem as ligações entre AOR e os autómatos modeladores de barramento (lugares *1.B* e *2.B*) e de linha (lugares *1.L* e *2.L*), sendo que os prefixos 1 e 2 simbolizam que a linha de chegada da RESP e o barramento de receção estão associados respetivamente ao ponto de interligação PCC 1 ou PCC 2. Esta comunicação entre AOR e os autómatos modeladores permite salvaguardar que apenas são efetuadas operações de recurso se todos os elementos envolvidos estiverem em condições de serem colocados em serviço, impedindo ligações indevidas e satisfazendo as condições de funcionamento 1, 2 e 3 enunciadas na secção 4.2.3 para as Operações de Recurso.

À exceção dos lugares *RECA*, *AOR.SUC* e *AOR.FAIL*, comuns a ambos os módulos de AOR, a nomeação dos lugares e transições deste automatismo é efetuada de acordo com a seguinte legenda:

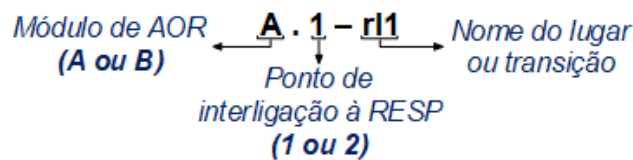


Figura 5.6: Legenda dos lugares e transições de AOR

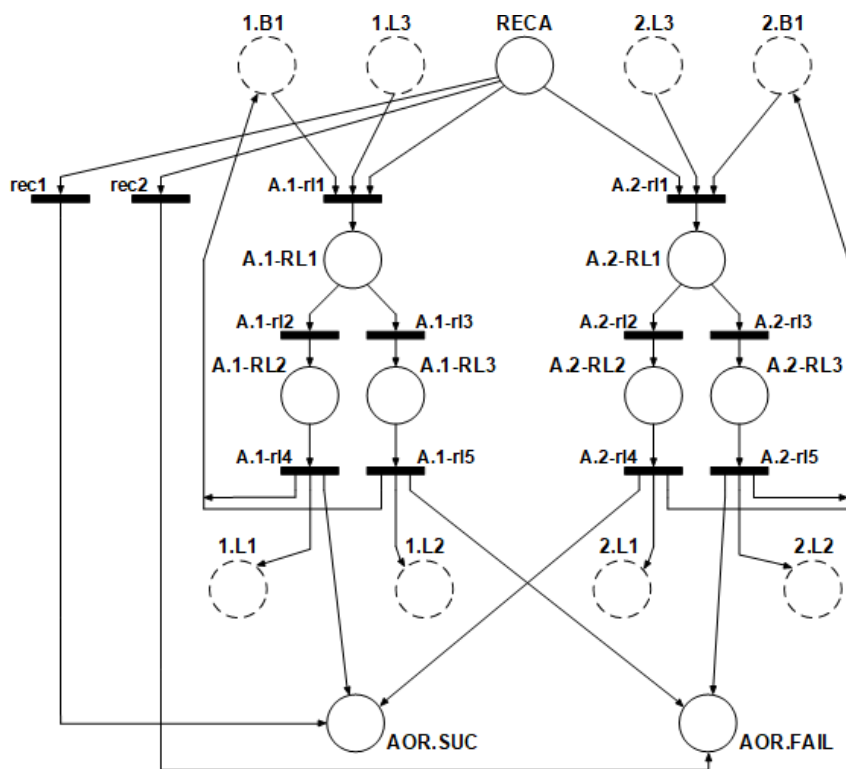


Figura 5.7: Rede de Petri interpretada do automatismo de AOR (módulo A)

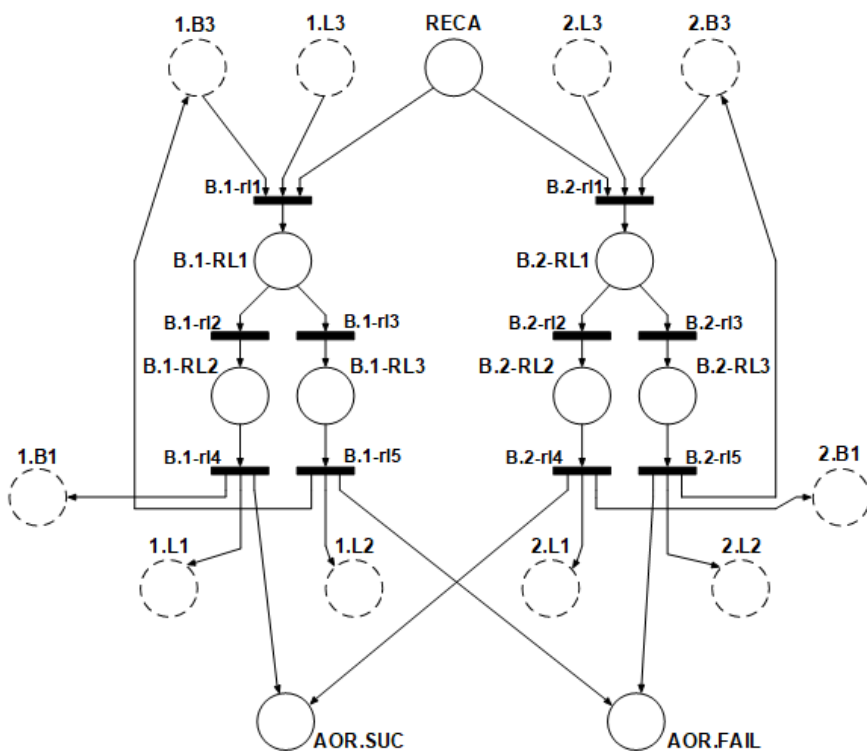


Figura 5.8: Rede de Petri interpretada do automatismo de AOR (módulo B)

Independentemente do ponto de interligação utilizado, a inicialização da operação de recurso implica que as linhas de chegada da RESP permaneçam religáveis, confirmado através da marcação do lugar *L3*. Relativamente aos barramentos, o estado dos mesmos para inicializar o automatismo de AOR é

distinto entre módulos. No módulo A, a interligação à RESP é efetuada com a micro-rede em ilha e a central de biomassa ativa, significando que os barramentos de receção já se encontram em serviço (lugar *B1*). Quanto ao módulo B, uma vez que a micro-rede se encontra sem alimentação, os barramentos estão sem tensão e a operação de recurso é inicializada apenas se a condição de religável estiver salvaguardada, confirmado caso o lugar *B3* esteja marcado.

O automatismo é ativado com a marcação do lugar *RECA*, correspondente à condição inicial de AOR. A partir deste ponto, a evolução do automatismo pode prosseguir através de seis transições distintas.

No módulo A, têm-se as transições *rec1* e *rec2*, as quais representam respetivamente que a interligação à RESP é efetuada por comando exterior (ordem do operador) ou que ambos os pontos de interligação estão indisponíveis. Dentro deste módulo, o automatismo pode ainda evoluir através das transições *A.1-rl1* e *A.2-rl1*, sendo transpostas caso a rede esteja em ilha e a operação de interligação à RESP seja efetuada através de PCC 1 ou PCC 2 pelo recurso à respetiva linha de chegada da RESP, respetivamente.

No módulo B, a evolução de AOR é realizada através das transições *B.1-rl1* e *B.1-rl2*, sendo a descrição das mesmas idêntica às transições do módulo A anteriormente referidas, à exceção de que a micro-rede se encontra no estado de *blackout*.

Os lugares *RL1*, comuns a todos os sentidos de evolução de AOR, representam a ordem de fecho do disjuntor de PCC envolvido na operação de recurso. O sucesso desta operação resulta na marcação do lugar *RL2* e, após a extinção de uma pausa de observação da estabilidade da micro-rede, é ativado o lugar *AOR.SUC*, significando o fim da operação de recurso com sucesso. Em caso de insucesso, é ativado o lugar *RL3* e, posteriormente, o lugar *AOR.FAIL*, representativo do fim da operação de AOR sem reposição da interligação à RESP.

Nas Tabelas 5.4 e 5.5 constam as interpretações dos lugares e transições de AOR. Em certas transições é necessário identificar o módulo a que pertencem, uma vez que as condições de transposição das mesmas são diferentes. Apresenta-se igualmente na Tabela 5.5 os predicados lógicos, definidos pela composição de variáveis lógicas, para cada transição e que traduzem as suas condições de transposição.

Tabela 5.4: Interpretação dos lugares da RdP do automatismo de AOR

Interpretação dos Lugares	
RECA	Condição inicial de ativação de AOR
RL1	Operação de fecho do disjuntor de interligação (PCC 1 ou PCC 2)
RL2	Sucesso da operação de interligação à RESP
RL3	Insucesso da operação de interligação à RESP
AOR.SUC	Fim da operação de AOR com sucesso da operação de recurso
AOR.FAIL	Fim da operação de AOR com insucesso da operação de recurso

Tabela 5.5: Interpretação das transições da RdP do automatismo de AOR

Transição	Interpretação	Predicado lógico
A.x-rl1	Comando de fecho do disjuntor de interligação referente a PCC x	$cdu \cdot dpcc(x)l$
B.x-rl1		$\overline{cdu} \cdot dpcc(x)l$
rl2	Lançamento de pausa para observação da estabilidade da micro-rede após a interligação à RESP	$opmr1$
A.x-rl3	Falha no fecho do disjuntor de interligação referente a PCC x	$dpcc(x)f$
B.x-rl3		$\overline{cdu} \cdot dpcc(x)f$
rl4	Fim da pausa de observação da estabilidade da micro-rede após a interligação à RESP	$cmr1$
rl5	Insucesso na operação de interligação à RESP	-
rec1	Reposição da interligação à RESP por comando exterior	$cdu \cdot (dpcc(1)f + dpcc(2))$
rec2	Ambos os pontos de interligação à RESP encontram-se indisponíveis	$(\overline{dpcc(1)l} + \overline{cintdu1(1)} + \overline{cintdu2(1)}) \cdot (\overline{dpcc(2)l} + \overline{cintdu1(2)} + \overline{cintdu2(2)})$

Legenda:

- cdu : tensão normalizada no barramento de receção, $U \in [U_{min}, U_{max}]$;
- $dpcc(x)l$: disjuntor de interligação de PCC x ligável, sendo $x \in \{1, 2\}$;
- $dpcc(x)f$: falha no fecho do disjuntor de interligação de PCC x , sendo $x \in \{1, 2\}$;
- $opmr1$: lançamento de pausa para observação da estabilidade da rede, após a interligação à RESP;
- $cmr1$: fim da pausa para observação da estabilidade da rede, após a interligação à RESP;
- $cintdu1(x)$: $\mu(x.B1) + \mu(x.B3) = 1$, barramento de receção referente a PCC x encontra-se em serviço ou religável, sendo $x \in \{1, 2\}$;
- $cintdu2(x)$: $\mu(x.L3) = 1$, linha de chegada da RESP referente a PCC x encontra-se religável, sendo $x \in \{1, 2\}$.

Resolução de conflitos

Com a inicialização de AOR identificada pela marcação do lugar *RECA*, visualiza-se a existência de um conflito entre os pares de transições *A.1-rl1/A.2-rl1* e *B.1-rl1/B.2-rl1*, o qual se verifica numa situação em que ambos os pontos de interligação (PCC 1 e PCC 2) se encontrem em condições de serem utilizados.

A resolução deste conflito é conseguida através da redefinição dos predicados lógicos das transições, adicionando-se novos parâmetros que permitem tornar as transições mutuamente exclusivas. Com esse intuito, define-se uma ordem de prioridades pré-definida em que PCC 2 é utilizado apenas se PCC 1 estiver indisponível, servindo PCC 2 como ponto de interligação de reserva. Na Tabela 5.6 apresentam-se as alterações ao nível dos predicados das transições para implementação do critério mencionado para a seleção do ponto de interligação.

Tabela 5.6: Modificação dos predicados para seleção pré-definida do ponto de interligação

Transição	Predicado lógico
A.1-r11	$cdu \cdot dpcc(1)l$
A.2-r11	$cdu \cdot dpcc(2)l \cdot (\overline{dpcc(1)l} + \overline{cintdu3(1)} + \overline{cintdu2(1)})$
B.1-r11	$\overline{cdu} \cdot dpcc(1)l$
B.2-r11	$\overline{cdu} \cdot dpcc(2)l \cdot (\overline{dpcc(1)l} + \overline{cintdu4(1)} + \overline{cintdu2(1)})$

Legenda:

- $cintdu3(x)$: $\mu(x.B1) = 1$, barramento de receção referente a PCC x encontra-se em serviço, sendo $x \in \{1, 2\}$;
- $cintdu4(x)$: $\mu(x.B3) = 1$, barramento de receção referente a PCC x encontra-se religável, sendo $x \in \{1, 2\}$.

5.2.3 Automatismo de Gestão da Interligação

Tendo em conta os princípios de funcionamento de IAMR, enunciados na secção 4.2.4, existe a necessidade de integrar em IAMR um mecanismo com a função de monitorizar o estado da micro-rede e efetuar a gestão das operações de recurso (AOR), associadas ao processo de interligação à RESP. É neste âmbito que surge o automatismo de Gestão da Interligação (GI).

O automatismo de GI monitoriza continuamente o modo de exploração da micro-rede, através da verificação das fontes de alimentação que se encontram ativas. Ocorrendo a desconexão da RESP por ação involuntária, o GI procede à validação do estado da micro-rede e efetua o pedido de interligação à RESP através de AOR. No final da operação de AOR, o GI recebe deste um *output* correspondente ao sucesso ou insucesso do processo de interligação à RESP, tornando a reavaliar o estado da micro-rede no sentido de verificar se permanece a necessidade de interligação à RESP.

Interpretação da Rede de Petri

O funcionamento do automatismo de GI é modelado através da RdP presente na Figura 5.9. O lugar $GI.REP$ representa o estado de repouso ou fim da operação de GI, sendo a inicialização do automatismo, associada à transposição da transição $gi1$ e marcação do lugar $GI.START$, desencadeada pela desconexão involuntária da RESP, cumprindo-se com a condição 1 de funcionamento de IAMR.

A partir do lugar $GI.START$, o automatismo evolui de acordo com o estado da micro-rede após a desconexão da RESP. Caso a micro-rede se encontre em ilha e alimentada pela central de biomassa (lugar $MR2$ ativado), a RdP de GI prossegue pela transição $gi2$ e dá-se início a uma pausa para avaliação da estabilidade da micro-rede em ilha (lugar $GI1$), referente à condição 2 de IAMR. Após o término desta pausa, não se verificando perturbações na rede, inicia-se a operação de recurso por AOR, ocorrendo a transposição da transição $gi4$ e a consequente marcação do lugar $GR2.A$. Caso contrário, o automa-

tismo de GI evolui pela transição *gi5* e ativa o lugar *GI3*, iniciando-se uma nova pausa para verificar se a instabilidade da rede desencadeia a desligação da central pela atuação das suas proteções de mínima frequência. Independentemente da central se manter ou não em serviço, representado respetivamente pela transposição das transições *gi8* e *gi9*, o automatismo retorna ao lugar *GI.START* para reavaliar o estado da micro-rede.

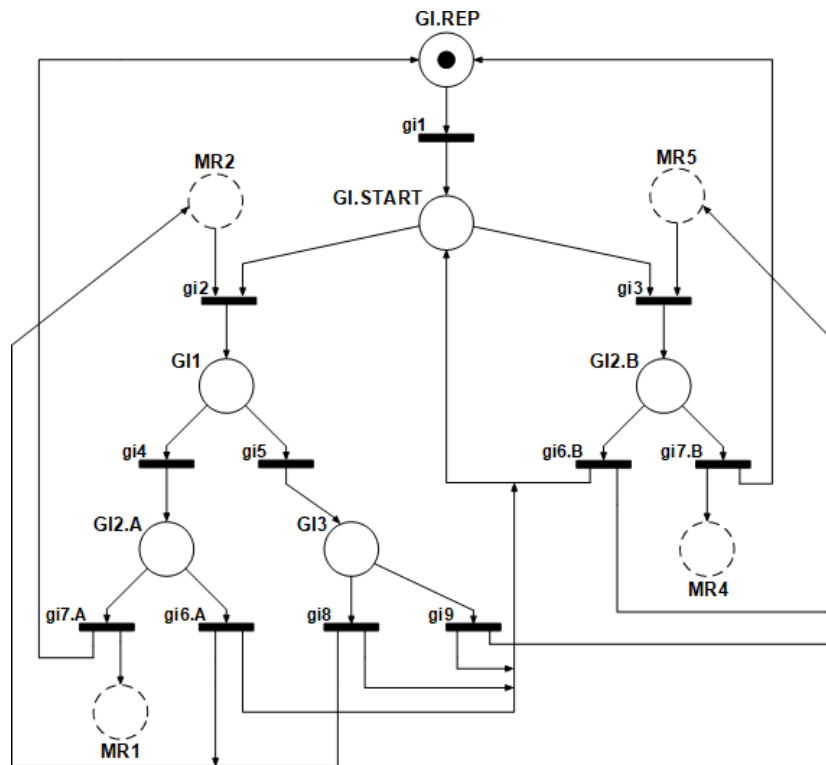


Figura 5.9: Rede de Petri interpretada do automatismo de GI

Regressando ao lugar *GI.START*, caso a desconexão da RESP culmine no *blackout* da instalação (lugar *MR5* ativado), o automatismo de GI evolui pela transição *gi3* e é efetuado um pedido imediato de tentativa de interligação à RESP através de AOR (lugar *GI2.B*), sem necessidade de pausa para avaliação da estabilidade da rede (condição 3 de IAMR).

A marcação dos lugares *GI2.A/GI2.B* significa que a operação de AOR está em curso, sendo que as transições *gi6.A/gi6.B* e *gi7.A/gi7.B* simbolizam respetivamente o insucesso e o sucesso de AOR. Sendo bem-sucedido, o automatismo retorna ao estado de repouso (lugar *GI.REP*). Caso contrário, o lugar *GI.START* é novamente ativo, repetindo-se o processo de avaliação do estado da micro-rede.

A interpretação dos lugares e transições da RdP de GI, bem como os predicados lógicos que traduzem as condições de transposição das transições, constam nas Tabelas 5.7 e 5.8.

Tabela 5.7: Interpretação dos lugares da RdP do automatismo de AOR

Interpretação dos Lugares	
GI.REP	Automatismo em repouso / Fim da Interligação Automática da Micro-rede
GI.START	Condição inicial da Gestão de Interligação
GI1	Avaliação da estabilidade da micro-rede em ilha
GR2.A / GR2.B	Pedido de interligação à RESP e operação de recurso (AOR) em curso
GR3	Avaliação do estado da central de biomassa

Tabela 5.8: Interpretação das transições da RdP do automatismo de GI

Transição	Interpretação	Predicado lógico
gi1	Desconexão da RESP (abertura do disjuntor de PCC por atuação das proteções); Lançamento de pausa para validar o estado da <i>micro-rede</i>	$cdmr1; opmr2$
gi2	Fim da pausa para validação do estado da micro-rede, encontrando-se em ilha e religável à RESP; Lançamento de pausa para avaliação da estabilidade da micro-rede em ilha	$cmr2; opmr3$
gi3	Fim da pausa de validação do estado da micro-rede e esta encontra-se sem alimentação (<i>blackout</i>)	$cmr2 \cdot \overline{cdu}$
gi4	Fim da pausa para avaliação da estabilidade da micro-rede em ilha; Tensão e frequência da rede normalizadas	$cmr3 \cdot cdu \cdot cdf$
gi5	Fim da pausa para avaliação da estabilidade da micro-rede em ilha; Micro-rede com perturbações no seu funcionamento; Lançamento de temporização para verificar se a central permanece em serviço	$cmr3 \cdot (\overline{cdu} + \overline{cdf}); opmr4$
gi6.A / gi6.B	Fim do AOR, operação de interligação à RESP sem sucesso	$\overline{dpcc(1)}fch \cdot \overline{dpcc(2)}fch$
gi7.A / gi7.B	Fim do AOR, operação de interligação à RESP com sucesso	$cdu \cdot cdf \cdot (dpcc(1)fch \cdot dpcc(2)fch)$
gi8	Fim da temporização de verificação da central; Central em serviço	$cmr4 \cdot cdf \cdot dcbfch$
gi9	Fim da temporização de verificação da central; Desligação da central	$cmr4 \cdot \overline{cdf} + \overline{dcbfch}$

Legenda:

- cdf : nenhum relé de mínimo de frequência ativo e frequência na micro-rede normalizada, $f \in [f_{min}, f_{max}]$;
- $cdmr1$: $\mu(MG2) + \mu(MG5) = 1$, micro-rede em ilha ou sem alimentação (*blackout*);
- $opmr2$: lançamento de pausa para validação do estado da micro-rede;
- $cmr2$: fim da pausa para validação do estado da micro-rede;
- $opmr3$: lançamento de pausa para avaliação da estabilidade da micro-rede em ilha;
- $cmr3$: fim de pausa para avaliação da estabilidade da micro-rede em ilha;
- $dpcc(x)fch$: disjuntor de interligação de PCC x fechado, sendo $x \in \{1, 2\}$;
- $dcbfch$: disjuntor aos terminais da central de biomassa fechado;
- $opmr4$: lançamento de temporização para verificação da permanência da central em serviço;
- $cmr4$: fim de temporização para verificação da permanência da central de biomassa em serviço.

5.2.4 Automatismo completo de IAMR

O automatismo de Interligação Automática da Micro-rede (IAMR) é definido pela agregação dos automatismos de GI e AOR, aos quais são ainda interligados os autómatos modeladores de micro-rede,

linhas de chegada da RESP e barramentos de recepção. A comunicação estabelecida entre os diversos módulos de IAMR permite a realização das diversas operações referentes à atuação do automatismo, descrevendo-se nas próximas secções as interações existentes entre as RdP de GI e AOR e a forma como os autómatos modeladores são integrados na RdP global. No Anexo D, visualiza-se a RdP completa do automatismo de IAMR (ver Figura D.2).

Interação entre os automatismos de GI e AOR

O automatismo de GI monitoriza continuamente o estado da micro-rede e, verificando as condições necessárias para restabelecer a interligação à RESP, efetua o pedido de interligação a AOR. O pedido de interligação corresponde à marcação do lugar *GI2.A* ou *GI2.B* da RdP de GI (ver Figura 5.9). Com a ativação destes lugares, resultante da transposição da transição *gi4* ou *gi3*, é simultaneamente inicializado AOR através da marcação da lugar *RECA* (ver Figuras 5.7 e 5.8), correspondente à condição inicial de AOR e a uma pós-condição das transições de GI referidas. Enquanto o AOR estiver em curso, o GI permanece em *standby* uma vez que as transições (*gi6.A/gi6.B* e *gi7.A/gi7.B*), as quais têm como lugares precedentes *GI2.A* ou *GI2.B* respetivamente, possuem como pré-condição os lugares associados ao fim da operação de AOR. Desta forma, estas transições de GI são apenas disparáveis após o término de AOR com sucesso (lugar *AOR.SUC*) ou insucesso (*AOR.FAIL*).

Na Figura 5.10 representam-se as ligações entre as RdP associadas à interação entre GI e AOR.

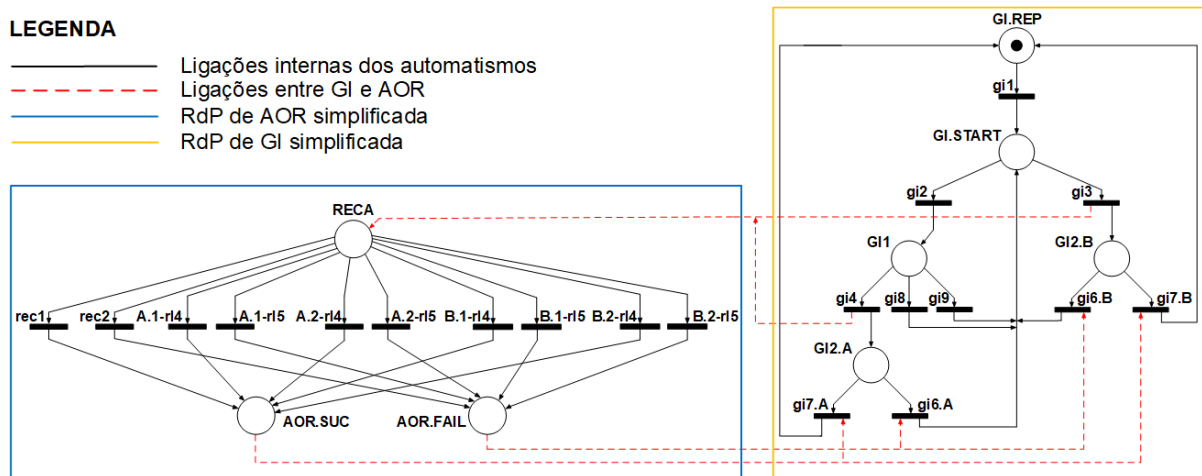


Figura 5.10: Interação entre os automatismos de GI e AOR

Integração dos autómatos modeladores

Os autómatos modeladores são integrados no automatismo de IAMR para servir de pré-condição à transposição de certas transições dos automatismos de GI e AOR. O automatismo de GI apenas é inicializado com a verificação de que a micro-rede se encontra em ilha e religável à RESP ou em *blackout*, sendo estados validados com a marcação respetiva dos lugares *MR2* e *MR5* do autómato que modela a micro-rede. Relativamente ao AOR, a evolução do mesmo depende do estado dos elementos

que poderão estar envolvidos na interligação à RESP, efetuando a verificação de que os barramentos de receção se encontram em serviço (lugar *B1*) ou religáveis (lugar *B3*) e se as linhas de chegada da RESP são igualmente religáveis (lugar *L3*). No fim da tentativa de religação à RESP, os automatismos de GI e AOR modificam os lugares dos autómatos modeladores de acordo com a passagem de estado que ocorra nos elementos envolvidos na interligação, conforme o sucesso ou insucesso da operação de AOR. Na Tabela 5.9 constam as operações realizadas por GI e AOR sobre os autómatos modeladores.

Tabela 5.9: Interações entre os autómatos modeladores e automatismos

Autómatos modeladores \ Automatismos	<i>Gestão da Interligação</i>	<i>Automatismo de Operação de Recurso</i>
<i>Micro-rede</i>	Verificação / Modificação	-
<i>Barramento</i>	-	Verificação / Modificação
<i>Linha</i>	-	Verificação / Modificação

Análise estrutural das Redes de Petri

Com o intuito de validar a lógica de funcionamento do automatismo de IAMR, procede-se à análise estrutural dos automatismos integrantes de IAMR individualmente, sendo igualmente analisado o funcionamento do automatismo global. A análise estrutural das RdP permite verificar as suas propriedades estruturais e dinâmicas, bem como identificar eventuais *deadlocks* no funcionamento dos automatismos, assegurando-se desta forma a correção do domínio de controlo das RdP. A metodologia de análise dos automatismos aplicada neste trabalho não possibilita a verificação do domínio operacional associado aos predicados e operadores lógicos das respetivas RdP, sendo esta importante principalmente numa fase de implementação e de validação completa da lógica de automação.

No anexo D constam as RdP utilizadas e os resultados completos das análises estruturais efetuadas, apresentando-se nesta secção apenas os principais resultados e conclusões retiradas.

• Automatismo de Operação de Recurso (AOR)

Na análise estrutural de AOR utiliza-se a RdP apresentada na Figura D.1, a qual é composta pelos dois módulos (A e B) definidos para este automatismo e pelos os autómatos modeladores (linhas e barramentos) que interagem diretamente com AOR. Nota para o facto de a RdP de AOR não ser reinicializável quando isolada da RdP global de IAMR, acrescentado-se duas transições auxiliares (*aux1* e *aux2*) para colmatar este aspeto e impedir o bloqueio nos lugares *AOR.SUC* e *AOR.FAIL*.

Com os resultados presentes na Tabela D.1, referentes às propriedades dinâmicas e estruturais da RdP de AOR, valida-se o domínio de controlo do automatismo. Através da análise dos invariantes de lugares e de transições, retiram-se conclusões acerca do funcionamento de AOR:

- **Invariantes de lugares:** O invariante 5, onde estão incluídos todos os lugares da RdP de AOR,

garante a exclusividade mútua das operações de recurso associadas aos módulos A (lugares *A.1* e *A.2*) e B (lugares *B.1* e *B.2*), assegurando a impossibilidade de atuação simultânea sobre ambos os disjuntores de PCC. Os restantes invariantes estão associados à interação entre os módulos de AOR e os autómatos modeladores.

- **Invariantes de transições:** Através dos invariantes de transições, associados às sequências de transições que permitem reinicializar o automatismo, visualiza-se novamente a exclusividade mútua das operações de recurso de AOR. Da lista de invariantes de transições presente na Tabela D.1, destacam-se os invariantes 21 a 40, referentes às operações de recurso com e sem sucesso dos módulos de AOR. Pela análise destes invariantes, conclui-se que as operações de recurso de módulos distintos não ocorrem simultaneamente e que o fim da sequência de transições de cada recurso devolve a RdP de AOR ao seu estado inicial.

• **Gestão da Interligação (GI)**

A análise estrutural de GI é efetuada através da RdP presente na Figura 5.9 e tem em conta a interação direta de GI com o autómato modelador da micro-rede. Os resultados desta análise, presentes na Tabela D.2, permitem validar as propriedades dinâmicas e o correto funcionamento lógico da RdP de GI, igualmente verificado através dos respetivos invariantes de lugares e transições:

- **Invariantes de lugares:** O invariante 1 engloba todos os lugares que integram a RdP de GI, permitindo assegurar que GI apenas efetua um único pedido de interligação à RESP e só tem a possibilidade de realizar novo pedido após o término da operação de recurso anterior. O invariante 2 refere-se a interação entre GI e o autómato modelador da micro-rede.
- **Invariantes de transições:** Pela análise dos invariantes de transições, visualiza-se a exclusividade mútua dos sentidos de evolução da RdP de GI e a capacidade de reinicialização do automatismo, concluindo-se novamente que apenas pode ocorrer um pedido de interligação à RESP se nenhuma operação de recurso estiver em curso.

• **Automatismo completo de Interligação Automática da Micro-rede (IAMR)**

Na análise estrutural do automatismo completo de IAMR utiliza-se a RdP representada na Figura D.2, onde são visíveis os automatismos (GI e AOR) e os autómatos modeladores (micro-rede, barramentos e linhas) que integram IAMR.

A RdP global de IAMR é constituída por 40 lugares e 71 transições. Os resultados da sua análise estrutural, apresentados nas Tabelas D.3 e D.4, permitem classificar a RdP de IAMR como viva, limitada, segura e reversível, satisfazendo as propriedades dinâmicas essenciais para a validação do domínio de controlo do automatismo.

Em termos de invariantes na RdP, totalizam-se 8 invariantes de lugares e 86 invariantes de transições, entre os quais estão incluídos invariantes abordados nos automatismos de GI e AOR e outros que determinam as interações entre os diversos automatismos e autómatos modeladores:

- **Invariantes de lugares:** De entre os invariantes de lugares, destaca-se o invariante 6, o qual estabelece a exclusividade mútua entre as operações de AOR e de GI. Quando GI se encontra

em repouso (*GI.REP*), em inicialização (*GI.START*) ou em processo de avaliação da estabilidade da micro-rede (*GI1*) ou da central de biomassa (*GI3*), nenhum lugar de AOR se encontra ativo. Apenas se verifica a marcação de lugares de AOR quando os lugares de GI indicadores de que AOR está em curso (*GI2.A* e *GI2.B*) estão ativos, sendo estes os únicos lugares de GI que não estão incluídos no invariante mencionado. À exceção do invariante 5, semelhante ao invariante 6 e que apenas serve para estabelecer as relações entre GI, AOR e o autómato modelador da micro-rede, os outros invariantes já estão incluídos nas análises estruturais de GI e AOR.

- **Invariantes de transições:** Os invariantes de transições refletem os diversos sentidos de evolução de IAMR e permitem validar novamente a exclusividade mútua dos módulos de AOR, estando agora consideradas as sequências de transições de GI, que juntamente com a evolução dos autómatos modeladores determinam o módulo de AOR que efetuará a operação de recurso.

5.3 Considerações sobre a implementação dos automatismos

Na presente secção são abordadas hipóteses relativamente à implementação dos automatismos propostos para a micro-rede do CMSM, efetuando-se uma contextualização das normas internacionais envolventes e nas quais deve assentar a arquitetura do sistema. Não se tem como objetivo definir, desde já, a arquitetura do SPCC da micro-rede, mas sim compreender os requisitos técnicos fundamentais para uma implementação normalizada dos automatismos, especificados através de RdP, no sistema de automação da micro-rede.

5.3.1 Implementação normalizada

Com o intuito de maximizar a interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes e reduzir a complexidade e os custos de implementação de sistemas de automação nos mais variados tipos de redes de energia elétrica, têm surgido nas últimas décadas normas internacionais no âmbito da programação de controladores lógicos programáveis (PLC's) e de protocolos de comunicação.

CEI 61131

A norma CEI 61131 surge em 1993 com a finalidade de uniformizar o ambiente de programação de PLC's no contexto da automação industrial, tendo sido igualmente adotada na programação de controladores com outras aplicações, como sistemas de controlo e de automação de redes de energia.

Esta norma estabelece um conjunto de requisitos de compatibilidade e de funcionalidades para novos sistemas de automação, destacando-se a terceira parte da mesma (CEI 61131-3), onde são descritas as linguagens normalizadas de programação de PLC's [28]. Deste modo, garante-se que a programação de controladores é independente do fabricante do *hardware*, proporcionando uma maior flexibilidade na implementação, manutenção e reestruturação dos sistemas de automação.

Apesar das RdP não integrarem as linguagens normalizadas, existem atualmente ferramentas de conversão de RdP para linguagens CEI 61131-3, facilitando a implementação de automatismos especificados através de RdP em PLC's.

CEI 61850

A norma CEI 61850 - "*Communication Networks and Systems in Substations*" surge em 2003 com o objetivo de implementar um protocolo de comunicações que permitisse a interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes conectados a uma mesma rede de comunicações, fornecendo um conjunto de serviços para o suporte e transferência de dados. Apesar de ter sido inicialmente concebida para aplicação no âmbito da arquitetura de comunicações em Subestações, a CEI 61850 possui uma versatilidade e uma série de funcionalidades que permitem solucionar desafios exigentes em termos de proteção, operação e controlo de qualquer tipo de rede elétrica. [29]

Na parte 7 da norma CEI 61850 é definido um serviço de comunicação horizontal entre os dispositivos físicos da rede: as mensagens GOOSE - "*Generic Oriented Object Substation Event*", utilizadas na transmissão dos vários tipos de informação entre os dispositivos que constituem o SPCC de uma rede. Este serviço baseia-se nos princípios de *publisher-subscriber* e *peer-to-peer* na transmissão e comunicação de dados, significando que cada nó (dispositivo) da rede pode atuar como servidor ou cliente e "publicar" mensagens GOOSE, as quais são categorizadas em diferentes classes e subscritas apenas pelos dispositivos configurados para receber mensagens da classe transmitida. O serviço de mensagens GOOSE proporciona elevadas velocidades de transmissão de dados entre DEI's, estando associado ao facto do mapeamento das mesmas ser efetuado diretamente na *Layer 2* (Ethernet) do modelo OSI, eliminando o processamento de *layers* intermédias [30].

Atualmente, a automação de redes de AT e MT assenta em arquiteturas CEI 61850, sendo esta facilmente adaptada ao caso específico da micro-rede do CSM, tendo-se como única desvantagem o facto de exigir uma rede *Ethernet* local, o que se pode traduzir num investimento apreciável.

5.3.2 Arquitetura do SPCC

Esta secção foca-se numa implementação centralizada dos automatismos propostos para a micro-rede, tendo em conta as conclusões dos trabalhos desenvolvidos em [31, 32], no âmbito da implementação de funções de automatismos especificadas em RdP para Subestações com arquiteturas CEI 61850.

A distribuição da execução das RdP dos automatismos pelos diversos DEI's corresponde a uma solução complexa e com elevadas dificuldades de implementação. O serviço de mensagens GOOSE da CEI 61850 apresenta limitações na resolução em tempo real de conflitos entre automatismos, associados ao paralelismo temporal e à concorrência entre as RdP das diversas funções integradas. Nota ainda para o facto de a maioria dos DEI's não cumprirem com a CEI 61131-3 e possuírem uma capacidade limitada de lógica programável, dificultando a implementação completa dos automatismos. Desta

forma, prescinde-se de uma implementação distribuída dos automatismos na micro-rede em estudo.

Numa abordagem de implementação centralizada, o domínio operacional das RdP é centralizado num controlador único que, no âmbito de uma micro-rede, é designado como *Microgrid Central Controller* (MGCC) [34]. Na arquitetura do SPCC, o MGCC localiza-se no mesmo patamar hierárquico dos DEI's, estabelecendo-se uma comunicação horizontal entre os dispositivos através da troca de mensagens GOOSE. O envio de mensagens GOOSE envolve a transmissão de variáveis lógicas (simples ou compostas) que reportam a alteração de estados de determinados elementos do SPCC e que servem de *input* ao MGCC para a execução dos automatismos, caso o fluxo de informação seja no sentido DEI's - MGCC, ou a transmissão de ordens de manobra de disjuntores no sentido MGCC - DEI's.

Na Figura 5.11 ilustra-se a arquitetura do SPCC da micro-rede, considerando uma implementação centralizada de automatismos. Os DEI's obtêm por cablagem (*hardwire*) as informações relativas ao equipamento primário necessárias para efetuarem a composição dos predicados lógicos dos automatismos, sendo posteriormente comunicados ao MGCC por intermédio de mensagens GOOSE. Inversamente, o MGCC executa os automatismos e transmite aos DEI's comandos de atuação no equipamento primário.

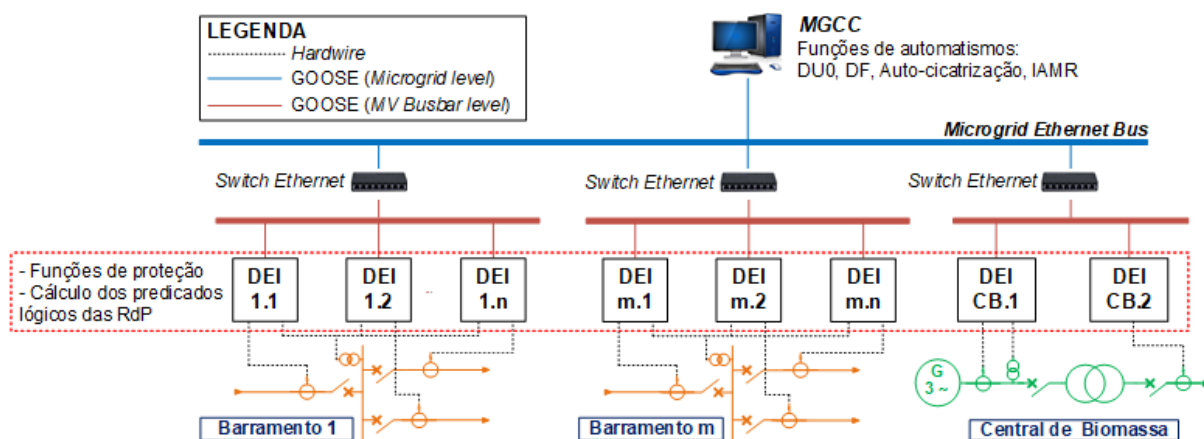


Figura 5.11: Arquitetura do SPCC da micro-rede: Implementação centralizada dos automatismos

O MGCC, além de atuar no comando e controlo da micro-rede, pode ainda desempenhar outras funções ao nível da gestão e da interface do operador com a instalação, tais como:

- Gestão automática dos consumos da instalação, ajustando o pico de carga através de medidas de gestão eficiente de consumos (*demand-side management*);
- Ajuste automático da geração local, através da otimização do ponto de operação da UPAC;
- Arranque automático dos geradores diesel de *backup*, assim que seja detetado o *blackout* da instalação.
- Funcionalidades de supervisão, aquisição de dados e de HMI (*Human-Machine Interface*), utilizadas para gerar relatórios de eventos e de avaliação do desempenho da instalação e permitir o controlo remoto da topologia de exploração e dos RED's existentes na micro-rede.

Capítulo 6

Conclusões

6.1 Considerações finais

O presente trabalho, realizado no âmbito das *smart grids* e que articula as áreas de Energia e de Sistemas de Decisão e Controlo, tem como foco o desenvolvimento do projeto de uma micro-rede com altos requisitos de fiabilidade para instalações militares, aplicando-se a um caso de estudo real: o Campo Militar de Santa Margarida (CMSM).

A primeira fase deste trabalho, referente ao estudo de reconhecimento da rede do CMSM, permitiu reunir as informações necessárias acerca da instalação que viriam a possibilitar o cumprimento gradual com sucesso dos objetivos traçados para este trabalho:

- **Caracterização da rede atual:** O tratamento dos dados recolhidos permitiu caracterizar os diversos elementos da rede e efetuar uma estimação do padrão de consumos registado atualmente na instalação. Desta forma, foi possível criar um modelo matemático em *Simulink* para análise do comportamento da rede em regime estacionário, o que permitiu simular e avaliar o funcionamento da rede em condições de exploração próximas da realidade e testar diferentes topologias de exploração e cenários de carga;
- **Identificação das limitações da rede atual:** As limitações identificadas definem as reestruturações que serão futuramente necessárias para que se possa avançar com a implementação de uma micro-rede no CMSM ajustada aos requisitos de segurança e fiabilidade da instalação. A análise do equipamento primário e secundário existente na rede de MT do CMSM, permitiu concluir de imediato a impossibilidade de implementação de um SPCC dedicado à gestão e ao controlo da micro-rede.
- **Dimensionamento de uma unidade de geração própria:** Tendo em conta a especificidade do caso de estudo, um sistema de co-geração implementado através de uma central de biomassa revela-se como a solução mais vantajosa e que melhor se ajusta às necessidades reais do CMSM. A integração deste recurso energético, além de garantir uma maior autonomia e satisfazer os consumos elétricos e térmicos da instalação, contribui para uma maior eficiência energética e sustentabilidade ambiental na sua exploração, promovendo ainda o aproveitamento dos recursos endógenos do CMSM.
- **Definição dos princípios operacionais de automação:** Tendo por base os princípios de funcionamento da micro-rede do CMSM, na qual já se considera a presença da central de biomassa, é proposto um conjunto de automatismos capaz de garantir a segurança exigida no fornecimento de energia elétrica, minimizar os tempos de interrupção e de reposição de serviço e mitigar a influência

negativa na perturbação da estabilidade da rede de defeitos internos ou externos que possam ocorrer na instalação. Para a lógica global de automação da micro-rede, são apresentadas soluções com diferentes níveis de complexidade, bem como as respetivas reestruturações necessárias, procurando-se dar a hipótese de escolha ao cliente que, com base nas funcionalidades pretendidas e na sua capacidade de investimento, irá definir a solução que melhor se enquadra nas necessidades do CMSM.

- **Especificação dos automatismos:** Os princípios operacionais definidos para o automatismo de Interligação Automática da Micro-rede (IAMR), dimensionado neste trabalho para automatizar o processo de interligação da instalação à RESP e aproveitar a existência de dois pontos de interligação, são especificados através de RdP. A aplicação das propriedades desta ferramenta permitem efetuar a validação do correto funcionamento lógico de IAMR. Por fim, são analisadas hipóteses de implementação dos automatismos, propondo-se uma arquitetura de sistema assente em normas de programação de *PLC's* (CEI 61131-3) e de comunicação e transmissão de dados (CEI 61850) entre os diversos dispositivos do SPCC.

6.2 Trabalhos futuros

No sentido de dar seguimento ao trabalho desenvolvido no âmbito do caso de estudo relativo ao CMSM, torna-se interessante abordar futuramente com maior profundidade alguns dos tópicos analisados, com o intuito de desenvolver o tema de micro-rede militar:

- **Determinar com maior rigor o ponto ótimo de localização da central de biomassa**, através da identificação dos pontos da instalação onde se verifique uma maior densidade de consumo de energia térmica, com o intuito de maximizar o rendimento da central;
- **Analisar o comportamento da micro-rede e da central de biomassa em termos de estabilidade transitória**, face a situações de ocorrência de defeitos e de transferências de carga entre a RESP e a central;
- **Implementar os automatismos num controlador lógico**, em *hardware* (PLC) ou *software* (softPLC), traduzindo as RdP em linguagens CEI 61131-3, com o intuito de validar o domínio operacional dos automatismos;
- **Testar o sistema de automação da micro-rede em ambiente laboratorial**, através da utilização de DEI's, de um controlador lógico para simular a função do MGCC e onde são implementados os automatismos, e da interligação destes dispositivos numa rede local Ethernet em ambiente CEI 61850, à semelhança do trabalho realizado em [31];
- **Estudar em detalhe as potencialidades do MGCC**, explorando as funções que este pode desempenhar na otimização da exploração da instalação e na interface do operador com os diversos elementos da micro-rede.

Referências

- [1] *SPIDERS: The Smart Power Infrastructure Demonstration for Energy Reliability and Security*, Sandia National Laboratories, 2012
- [2] Gail Reitenbach, "Military Microgrids: Wanted and Needed but Thought to Deploy", *POWER* magazine, Junho de 2014.
- [3] J. L. C. Pinto de Sá, "Automatismos comunicantes em Subestações de Distribuição", Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, Março de 1988.
- [4] G. Faria, "Auto-cicatrização de Redes MT sobre CEI 61850", Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa, Abril de 2014.
- [5] *Ciclo semanal opcional para os consumidores em MAT, AT e MT em Portugal Continental*, ERSE, Disponível em: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/tarifaseprecos/periodoshorarios/Paginas/CiclopcionalosconsumidoresMATATMT.aspx>.
- [6] *Informação sobre faturação de energia reativa: Princípios e boas práticas - Recomendação N.º 1/2010*, ERSE, Julho de 2010.
- [7] *1735 Power Logger: Users Manual*, Rev.1, Fluke Corporation, Março de 2006.
- [8] A. Baggini, F. Bua, "EN 50464-1 - European standardisation for transformer losses reduction", Leonardo Energy, 2011.
- [9] *SimpscapePowerSystems: Linear Transformer Block*, Mathworks. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/lineartransformer.html>.
- [10] E. Ras, "Transformadores de potência, de medida e de protecção", 3ª Edição, Almedina, 1975.
- [11] *Ficha técnica do cabo AL Voltalene H LXHIOZ1*, Prysmian Group.
- [12] *Guia Técnico*, Solidal, Quintas & Quintas, 2007.
- [13] *Calculation of Short-Circuit Currents in Three-Phase Systems*, ABB AG, 2007.
- [14] C. Galvão, "Redes elétricas de média e baixa tensão: Aspectos de projecto, licenciamento, exploração em contexto operacional", Dissertação de Mestrado, FEUP, Junho de 2010.
- [15] *SimpscapePowerSystems: RLC Line Parameters*, Mathworks. Disponível em: https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/power_lineparam.html.
- [16] *Caracterização das Redes de Distribuição a 31.dez.2017*, Regulamento de Acesso às Redes e às Interligações do Setor Elétrico, EDP Distribuição - Energia, S.A., Março de 2018.
- [17] I. Kasikci, "Short Circuits in Power Systems: A practical Guide to IEC 60909", Wiley-VCH, 2002.

- [18] *SimpScapePowerSystems: Load Flow*, Mathworks. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/loadflowbus.html>.
- [19] *DMA-C52-140/N: Transformadores de potência, Transformadores trifásicos, de 60 kV/MT - Características e ensaios*, 3^a Edição, EDP Distribuição - Energia, S.A., Fevereiro de 2007.
- [20] J. P. Sucena Paiva, "Redes de Energia Eléctrica: uma análise sistémica", 2^a Edição, IST Press, 2005.
- [21] *Decreto-Lei n.º 153/2014*, Diário da República n.º 202/2014, Série I de 2014-10-20, Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, Outubro de 2014.
- [22] Rui Castro, "Uma Introdução às Energias Renováveis: Eólica, Fotovoltaica e Mini-hídrica", 2^a Edição, IST Press, 2011.
- [23] *Data Sheet Three phase Synchronous Generators*, Ed. 11/05, Marelli Generators.
- [24] David M. Laverty, Robert J. Best, D. John Morrow, "Loss-of-mains protection system by application of phasor measurement unit technology with experimentally assessed threshold settings", IET Generation, Transmission & Distribution, Maio de 2014.
- [25] *Instalações AT e MT. Subestações de Distribuição: Projecto-tipo – Memória descritiva*, EDP Distribuição - Energia, S.A., Fevereiro de 2007.
- [26] J. L. C. Pinto de Sá, J. P. S. Paiva, "Design and Verification of Concurrent Switching Sequences with Petri Nets", IEEE Trans. Power Del., vol. 5, No.4, Outubro de 1990.
- [27] J. L. Paterson, "Petri Net Theory and the Modeling of Systems", Prentice-Hall, 1981.
- [28] Karl-Heinz John, Michael Tiegekamp, "IEC 61131-3: Programming Industrial Automation Systems", 1995.
- [29] B. Hampson, "Power System Operation and Control Solutions Using IEC 61850", 22nd Conference of the Electric Power Supply Industry, Setembro de 2018 Setembro de 2018.
- [30] M. Adamiak, D. Baigent, R. Mackiewicz, "IEC 61850 Communication Networks and Systems in Substations: An Overview for Users", 2009.
- [31] R. Parreira, "Implementação Normalizada de Automatismos de Subestações de Energia especificados por Redes de Petri", Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Dezembro de 2011.
- [32] J. L. C. Pinto de Sá, R. Cartaxo, "Implementing Substations Automatic Control Functions Designed with Petri Nets on IEC61850", IEEE Trans. Power Del., vol. 26, No.2, Abril de 2011.
- [33] *SimPowerSystems User's Guide*, Version 3, Hydro-Québec, TransÉnergie Technologies, MathWorks, Setembro de 2003
- [34] N. Hatziargyriou, "Microgrids Architectures and Control", Wiley, IEEE Press, 2014

Anexo A

Registo de diagramas de carga

Neste anexo são apresentados os diagramas de carga registados durante o período de reconhecimento da instalação do CMSM. Nas Figuras A.1 a A.6 constam os registos efetuados nos seis PT's seleccionados, de acordo com a escala de medições presente na Tabela 2.3 da secção 2.1.2.

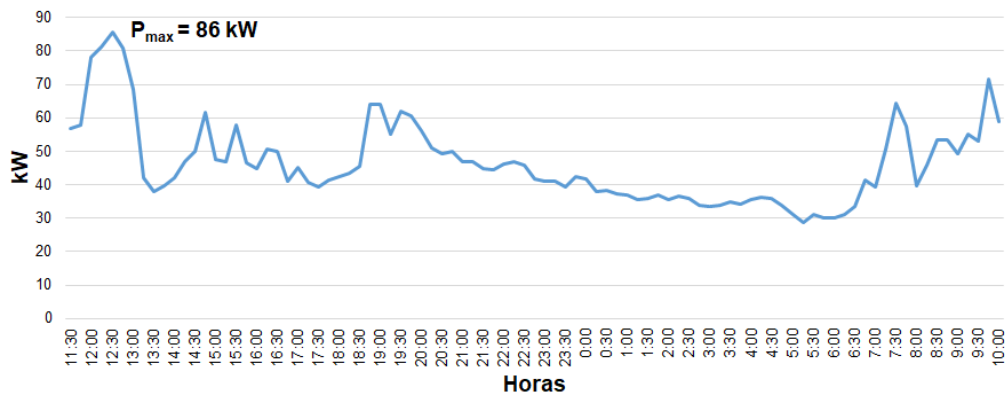


Figura A.1: Diagrama de carga do PT Cavalaria Monobloco (18/09 - 19/09)

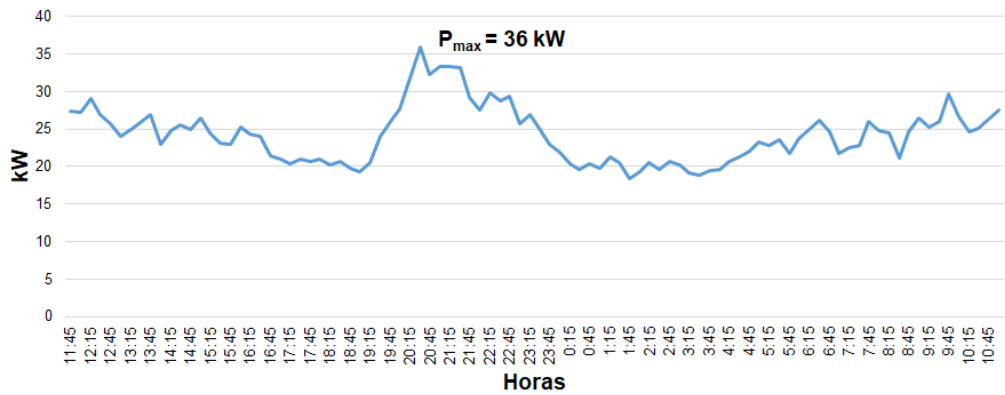


Figura A.2: Diagrama de carga do PT GAC (19/09 - 20/09)

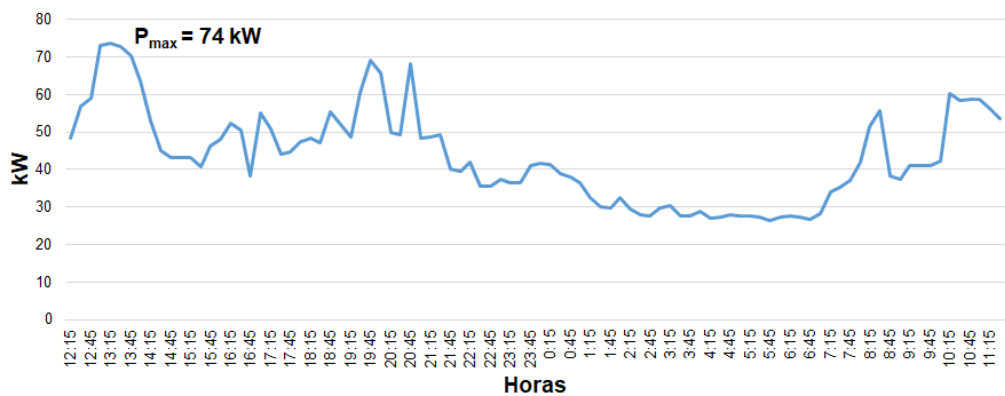


Figura A.3: Diagrama de carga do PT 1ªBIMEC (20/09 - 21/09)

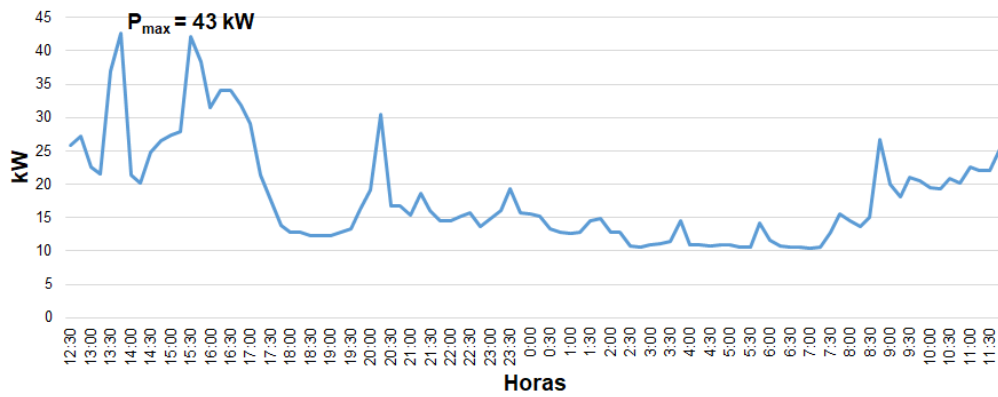


Figura A.4: Diagrama de carga do PT Correios (20/09 - 21/09)

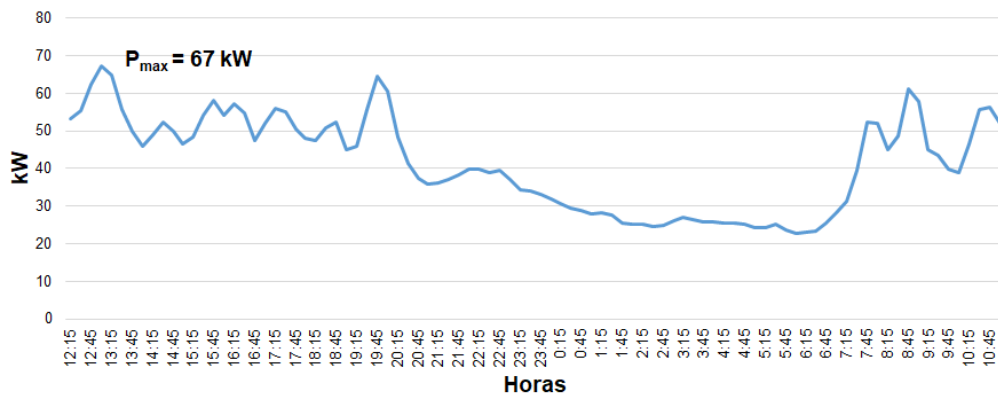


Figura A.5: Diagrama de carga do PT Unidade de Apoio (21/09 - 22/09)

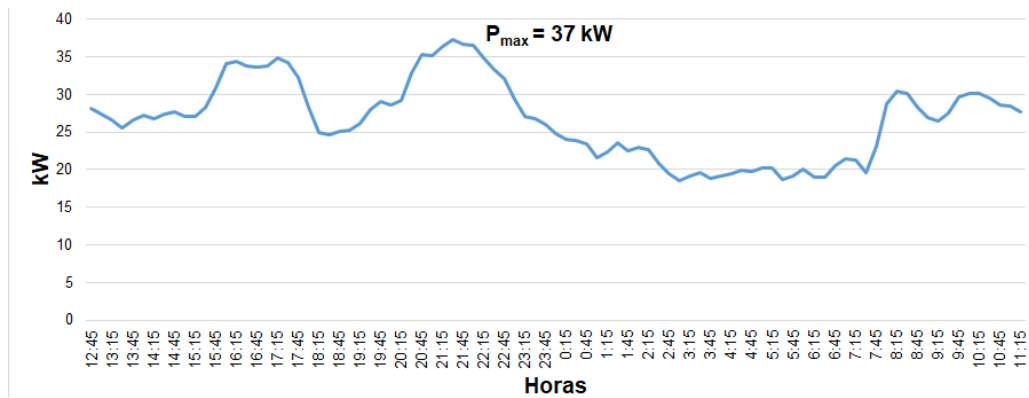


Figura A.6: Diagrama de carga do PT Transmissões (21/09 - 22/09)

Cada um dos diagramas de carga tem uma duração de registo próxima de 24 horas com um período de amostragem de 15 minutos, estando assinalado nas respetivas figuras as potências máximas registadas durante o período de medição.

Anexo B

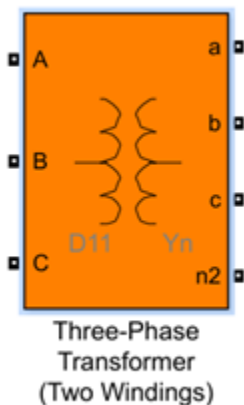
Modelação da rede em *Simulink*

Na modelação da rede de MT do CMSM, utiliza-se a *toolbox SimPowerSystems* [33] do *Simulink*, a qual possui um conjunto de bibliotecas e ferramentas utilizadas na modelação, simulação e análise de Sistemas de Energia Elétrica.

Neste anexo são apresentados os blocos modeladores utilizados na construção do modelo da rede e descritas as ferramentas de cálculo que apresentam utilidade no estudo efetuado neste trabalho.

B.1 Blocos modeladores

B.1.1 Transformadores



(a) Representação gráfica

Block Parameters: TP Cav. Torre 30kV/0.4kV 315kVA

Three-Phase Transformer (Two Windings) (mask) (link)

This block implements a three-phase transformer by using three single-phase transformers. Set the winding connection to 'Yn' when you want to access the neutral point of the Wye.

Click the Apply or the OK button after a change to the Units popup to confirm the conversion of parameters.

Configuration Parameters Advanced

Units pu

Nominal power and frequency [Pn(VA) , fn(Hz)] [315e3 , 50]

Winding 1 parameters [V1 Ph-Ph(Vrms) , R1(pu) , L1(pu)] [0, 0.0124/2, 0.0484/2]

Winding 2 parameters [V2 Ph-Ph(Vrms) , R2(pu) , L2(pu)] [0, 0.0124/2, 0.0484/2]

Magnetization resistance Rm (pu) 605.77

Magnetization inductance Lm (pu) 101.39

Saturation characteristic [i1 , phi1 ; i2 , phi2 ; ...] (pu) [23999 1.2; 0.99999 1.52]

Initial fluxes [phi0A , phi0B , phi0C] (pu): [0.80002 -0.80002 0.7]

(b) Janela de Parametrização

Figura B.1: Bloco Simulink modelador de transformador

Os transformadores são modelados como um transformador trifásico de dois enrolamentos, com os enrolamentos conectados em triângulo no lado do primário (MT) e em estrela (com neutro acessível) no secundário (BT). Na Figura B.1 apresenta-se o bloco modelador deste elemento e a sua janela de parametrização. O bloco modelador de transformador tem como principais *inputs* a frequência de funcionamento, a potência nominal e as características elétricas de cada enrolamento e do ramo de magnetização, parâmetros que se encontram especificados na secção 2.2.1, aquando da caracterização dos transformadores existentes na instalação.

B.1.2 Ramais

Os cabos subterrâneos e as linhas aéreas podem ambos ser representados através do esquema equivalente em II, caracterizado por uma impedância longitudinal e uma admitância transversal. O bloco modelador associado aos ramais de MT representa-se na Figura B.2, utilizando-se blocos com cores diferentes para distinguir visualmente os cabos e as linhas aéreas existentes no modelo da rede.

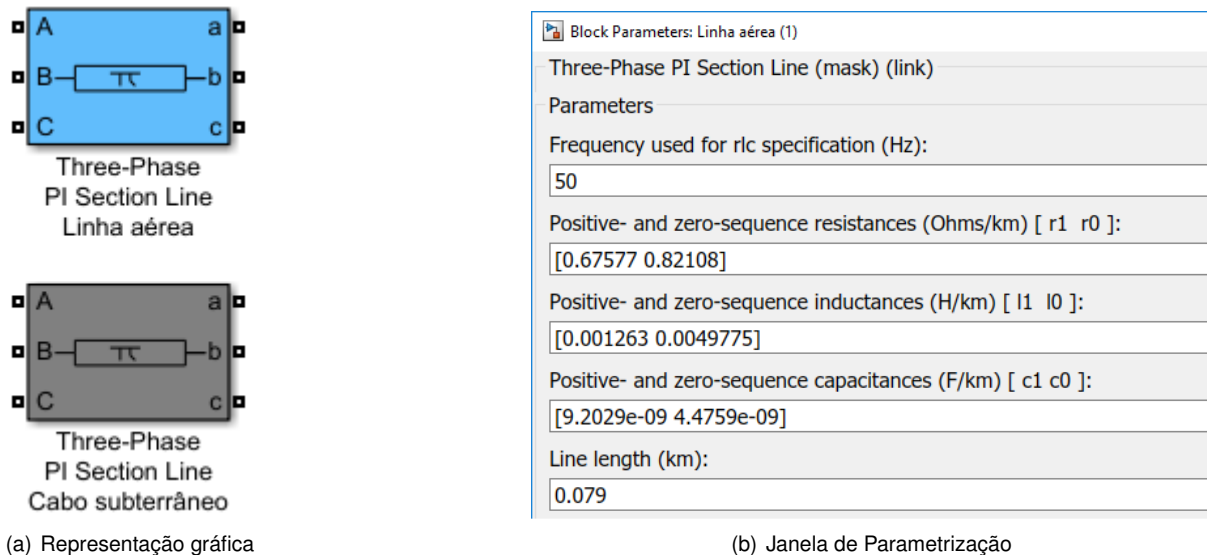


Figura B.2: Bloco Simulink modelador do esquema equivalente em II de linha trifásica

Atendendo à janela de parametrização, o bloco modelador de linha requer *inputs* relativos ao comprimento do ramal e às componentes direta e homopolar da resistência, indutância e capacidade em unidades por quilómetro. Os valores destas grandezas encontram-se especificados nas subsecções 2.2.2, 2.2.3 e 2.2.4 para os cabos subterrâneos, a linha aérea interna do CMSM e as linhas aéreas provenientes da Rede Pública a montante, respetivamente.

B.1.3 Rede a montante

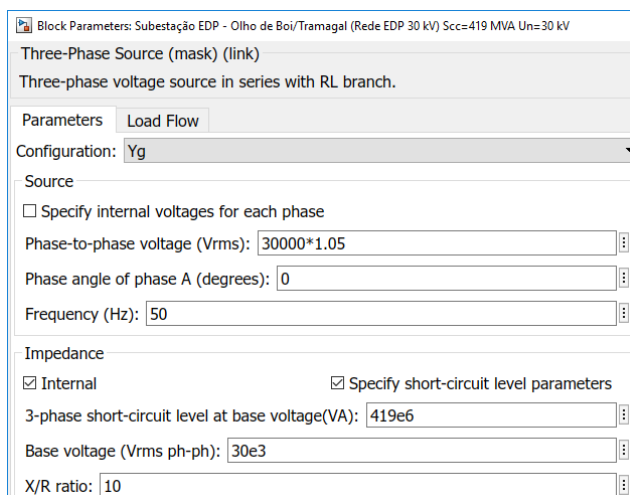
De forma a modelar a rede de distribuição a montante do CMSM, utiliza-se o bloco modelador de fonte de tensão trifásica, presente na Figura B.3.

Este bloco modelador modela de forma simplificada as SE EDP de Almourol e de Olho de Boi, as quais são especificadas pela tensão nominal, frequência da rede, potência de curto-circuito, relação X/R e pelo regime de neutro (*separador Configuration*). Na secção 2.2.4, relativa à caracterização das Subestações mencionadas, obtêm-se os *inputs* requeridos pelo bloco modelador.



Three-Phase Source

(a) Representação gráfica

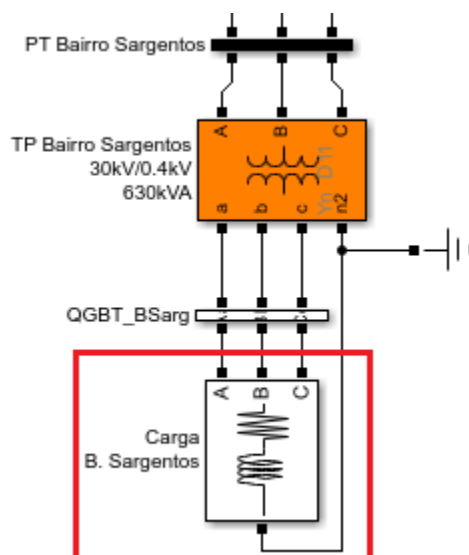


(b) Janela de Parametrização

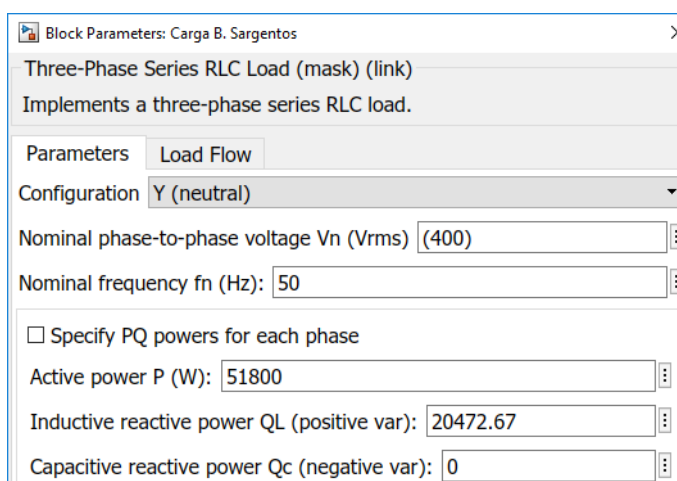
Figura B.3: Bloco *Simulink* modelador de tensão trifásica

B.1.4 Cargas

Na modelação das cargas utiliza-se o bloco modelador assinalado (a vermelho) na Figura B.4, a partir do qual se especificam os consumos ao nível da BT de cada PT da instalação. Consta-se pela mesma figura que a rede existente a jusante dos PT's é representada pelo QGBT e por uma única carga trifásica que aglomera todas as cargas que caracterizam os consumos do respetivo PT. O bloco modelador de carga tem como principais *inputs* a tensão nominal e os valores das potências ativa e reativa (indutiva e capacitiva), os quais são definidos de acordo com o cenário de carga que se pretenda simular.



(a) Representação gráfica



(b) Janela de Parametrização

Figura B.4: Bloco *Simulink* modelador de carga trifásica

B.1.5 Central de Biomassa

A modelação da Central de Biomassa é dividida em quatro componentes: gerador síncrono, turbina de vapor, regulador de velocidade e sistema de excitação. Na modelação do conjunto turbina de vapor e regulador de velocidade e do sistema de excitação utilizam-se modelos *Simulink* pré-definidos (*Steam Turbine and Governor* e *Excitation System*, respetivamente). O gerador é modelado através do bloco modelador de máquina síncrona, sendo também integrado no modelo uma carga referente aos serviços auxiliares da central. Na Figura B.5 representa-se o modelo da Central de Biomassa.

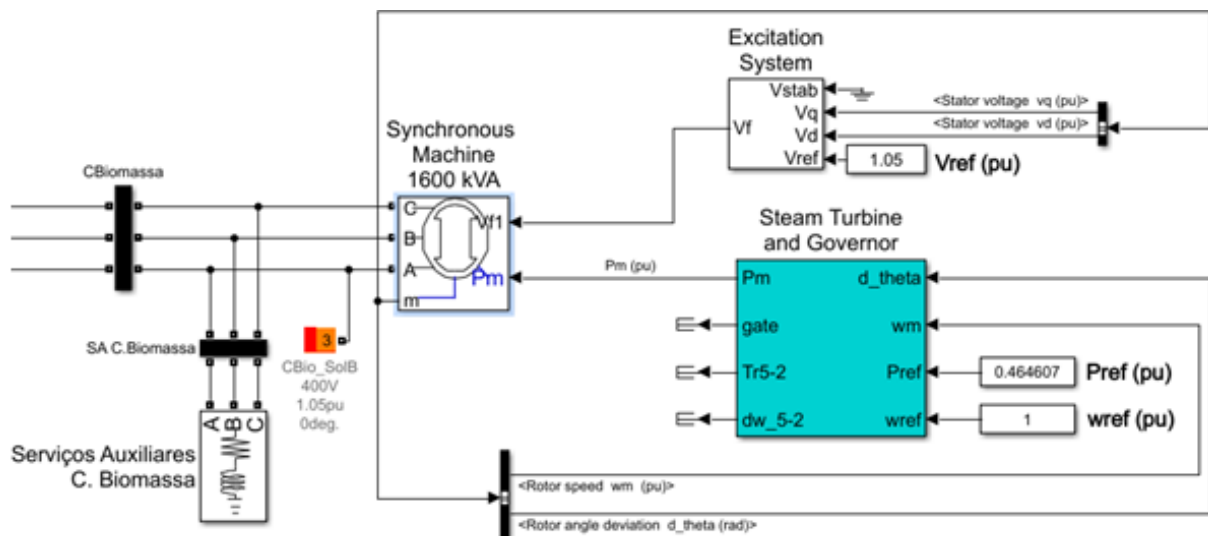


Figura B.5: Modelo *Simulink* da Central de Biomassa

Este modelo comporta-se como um sistema em malha fechada com retroação. Em cada instante da simulação, o sistema de excitação recebe, como *feedback* do gerador, *inputs* referentes às tensões no estator (V_d - eixo direto, V_q - eixo de quadratura), gerando um *output* referente à tensão aplicada ao enrolamento de excitação da máquina (V_f) para ajuste da tensão aos terminais do gerador para o valor de referência (V_{ref}). O conjunto turbina-regulador recebe valores da velocidade de rotação (ω_m) e do ângulo de desvio do rotor (d_theta), tendo como *output* o valor da potência mecânica (P_m) necessária para manter a velocidade de rotação do gerador no valor de referência (w_{ref}). Acerca das parametrizações de cada componente, relativamente ao conjunto turbina-regulador e ao sistema de excitação, utilizam-se os valores *default* dos respetivos modelos pré-definidos, não se entrou aqui em detalhe. Para o bloco modelador do gerador, apresenta-se na Figura B.6 a janela de parametrização.

Os *inputs* requeridos pelo modelo da máquina síncrona são obtidos através de fichas técnicas de geradores. De modo a configurar o modelo de acordo com os geradores síncronos dimensionados na secção 3.2.3, introduzem-se na janela de parametrização os respetivos valores associados aos parâmetros exigidos, os quais são apresentados nas Tabelas 3.3 e 3.4 da referida secção.

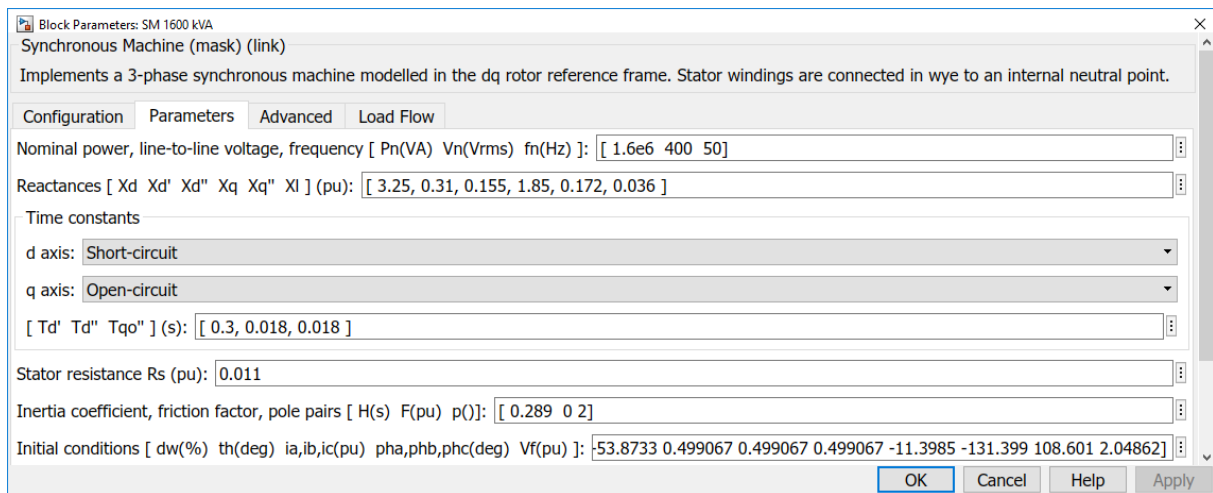
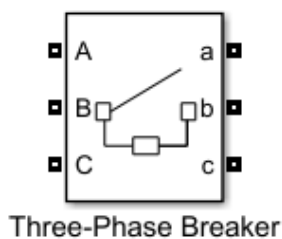


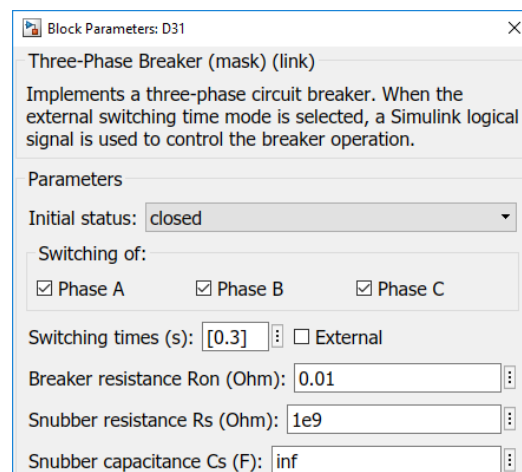
Figura B.6: Bloco *Simulink* modelador de máquina síncrona

B.1.6 Equipamentos de corte

A inclusão de equipamentos de corte (disjuntores) na modelação da rede tem como objetivo simplificar a alteração da configuração topológica da rede, facilitando a ação de deslastre/reposição de ramais para que se possa simular diferentes topologias de exploração.



(a) Representação gráfica



(b) Janela de Parametrização

Figura B.7: Bloco *Simulink* modelador de disjuntor

O bloco modelador representado na Figura B.7 modela o comportamento de um disjuntor, para o qual se define o estado inicial (*open/closed*), as fases em que atua e os instantes (*Switching times*) em que se verificam operações de abertura/fecho durante a simulação. Relativamente aos restantes *inputs* deste bloco modelador, referentes à resistência interna do disjuntor e à resistência e capacitância de amortecimento, utilizam-se os valores *default* do *Simulink*.

B.1.7 Curto-circuitos

A presença de defeito na rede é modelada através do bloco *Simulink* assinalado (a vermelho) na Figura B.8. Na parametrização deste bloco modelador, define-se o estado de defeito no início da simulação (*Initial status*: 0 - inativo; 1 - ativo), o momento da sua ocorrência/eliminação (*Switching times*) e o tipo de curto-circuito através da escolha das fases envolvidas no defeito e se existe contacto com a terra. Na janela de parametrização visualizam-se os restantes *inputs*, os quais são relativos à resistência de defeito, resistência de terra, entre outros, atribuindo-se aos mesmos os valores *default* do *Simulink*.

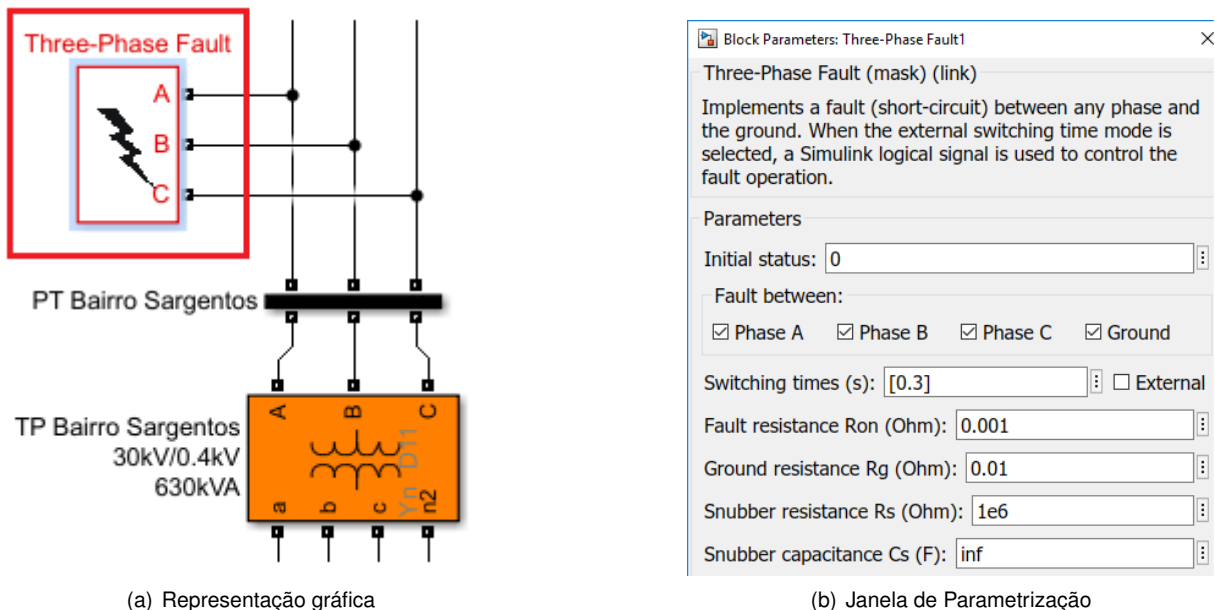


Figura B.8: Bloco *Simulink* modelador de curto-circuito

B.2 Ferramentas de cálculo

B.2.1 *RLC Line Parameters*

A ferramenta *RLC Line Parameters* é utilizada no cálculo dos parâmetros de linhas aéreas. Através das características construtivas e da geometria da linha, esta ferramenta calcula as matrizes das impedâncias e das capacitâncias nodais, bem como as respetivas componentes simétricas (direta, inversa e homopolar), as quais são exigidas pelo bloco modelador das linhas aéreas (ver secção B.1.2).

Atendendo à interface gráfica presente na Figura B.9, observam-se os *inputs* requeridos pela ferramenta, os quais podem ser divididos em três grupos:

- **General:** definição das características gerais do sistema - unidades de comprimento (sistema métrico ou inglês), frequência da rede e resistividade do solo;

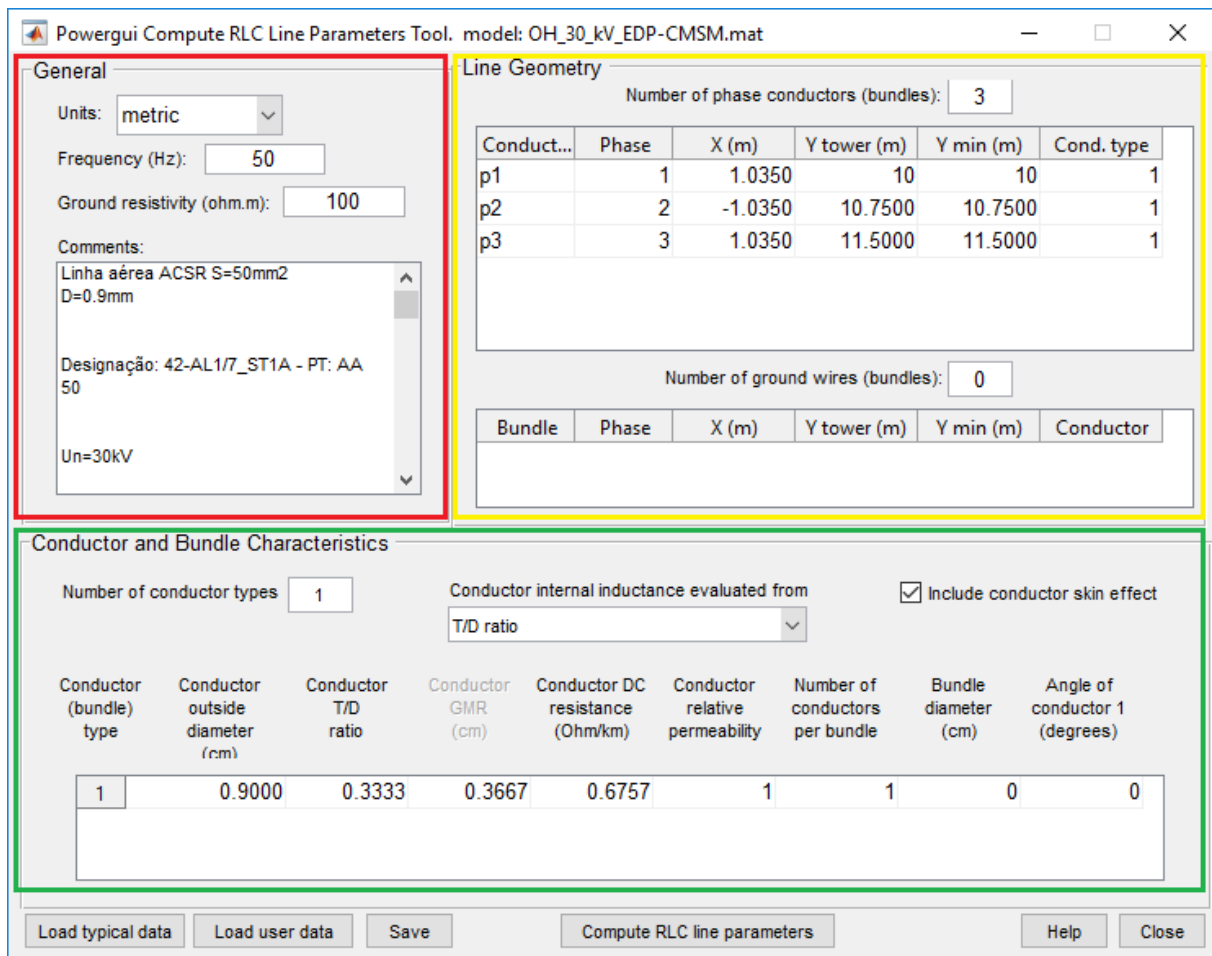


Figura B.9: Interface gráfica da ferramenta *RLC Line Parameters*

- **Line Geometry:** definição do número de fases da linha, cabos de guarda e da disposição geométrica dos condutores através das coordenadas X e Y . O referencial destas coordenadas, representado na Figura B.10, trata-se de um plano transversal da linha relativamente à torre que a sustenta. O valor de Y define a altura dos condutores (Y_{tower}) em relação ao solo ($Y = 0$) e a altura mínima que cada condutor atinge (Y_{min}), a qual geralmente se verifica no ponto médio entre duas torres devido ao raio de curvatura natural da linha, correspondendo à sua flecha. O valor de X define a posição de cada condutor relativamente ao eixo central da torre ($X = 0$);
- **Conductor and Bundle Characteristics:** definição do tipo e do número de condutores por fase, das respetivas características construtivas (diâmetro exterior, raio médio geométrico (GMR) e rácio T/D), da resistência DC (Ω/km) e da permeabilidade magnética relativa do material condutor. É também definida a forma como a indutância interna dos condutores é calculada pela ferramenta, selecionando-se uma das seguintes opções: o rácio T/D (*Thickness/Diameter*), o GMR ou a reatância direta da linha considerando um espaçamento de 1 metro entre fases. Por norma, em catálogos de fabricantes não constam valores destes parâmetros, mas pelos dados facultados facilmente se calcula o rácio T/D ou o GMR, optando-se por selecionar o rácio T/D como parâmetro de cálculo da indutância interna dos condutores. A ferramenta permite ainda que

se despreze ou não o efeito pelicular nos condutores, decidindo-se considerar a sua influência.

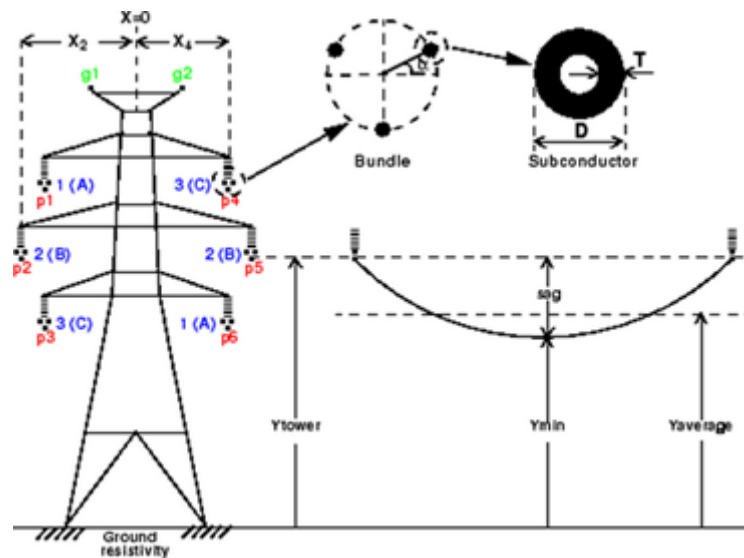


Figura B.10: Referencial XY dos condutores aéreos no *RLC Line Parameters* [13]

Como exemplo prático de aplicação desta ferramenta, procede-se à definição dos parâmetros da linha aérea existente na rede de MT do CMSM (ver secção 2.2.3):

- **Frequência e resistividade do solo** : 50 Hz e $100 \Omega \cdot m$ (um valor aproximado para um solo normal de uma zona temperada e tipicamente assumido para efeitos de estudo);
- **Número de tipo de condutores**: uma vez que não existem cabos de guarda, apenas existe o tipo de condutor (AA50) referente às fases, sendo cada fase constituída por um condutor;
- **Diâmetro exterior, rácio T/D, GMR e resistência DC do condutor**: Tratam-se de parâmetros obtidos diretamente dos dados fornecidos pelo fabricante (ver secção 2.2.3, Tabela 2.10). O rácio T/D corresponde à relação entre a espessura do material condutor (alumínio) e o diâmetro exterior, sendo que para o condutor AA50 tem-se $T = 3 \text{ mm}$ e $D = 9 \text{ mm}$, o que perfaz um valor de $T/D = 1/3$. O GMR (Geometric Mean Radius) pode ser calculado internamente pela ferramenta ou pela fórmula $GMR = r \cdot e^{-\frac{\mu_r}{4}}$, onde r é o raio do condutor e μ_r a permeabilidade magnética do material ($\mu_r \approx 1$ para materiais paramagnéticos, como o alumínio). Para a resistência DC, tem-se $R_{DC} = 0,6757 \Omega/km$, igualmente expresso na Tabela 2.10 da secção 2.2.3;
- **Geometria da linha**: Na definição das coordenadas X e Y referentes à disposição geométrica dos condutores da linha, recorre-se à DMA-C67-620N [14], um documento normativo da EDP Distribuição relativo a postes de betão para linhas aéreas de MT. Tendo por base a norma mencionada e a observação da linha aérea durante a visita de reconhecimento ao CMSM, assumem-se as seguintes características para a linha e os postes que a sustentam:
 - **Tipo de armação**: galhardete;
 - **Distância dos condutores ao eixo horizontal do poste**: $1,035 \text{ m}$;

- **Altura (H) e profundidade de enterramento (hf):** $H = 14 \text{ m}$ e $hf_{min} = H/10 + 0,5 \approx 2 \text{ m}$;
- **Altura dos condutores em relação ao solo:** Os três condutores que compõem a linha estão a uma altura de 10 m, 10,75 m e 11,5 m, respetivamente;

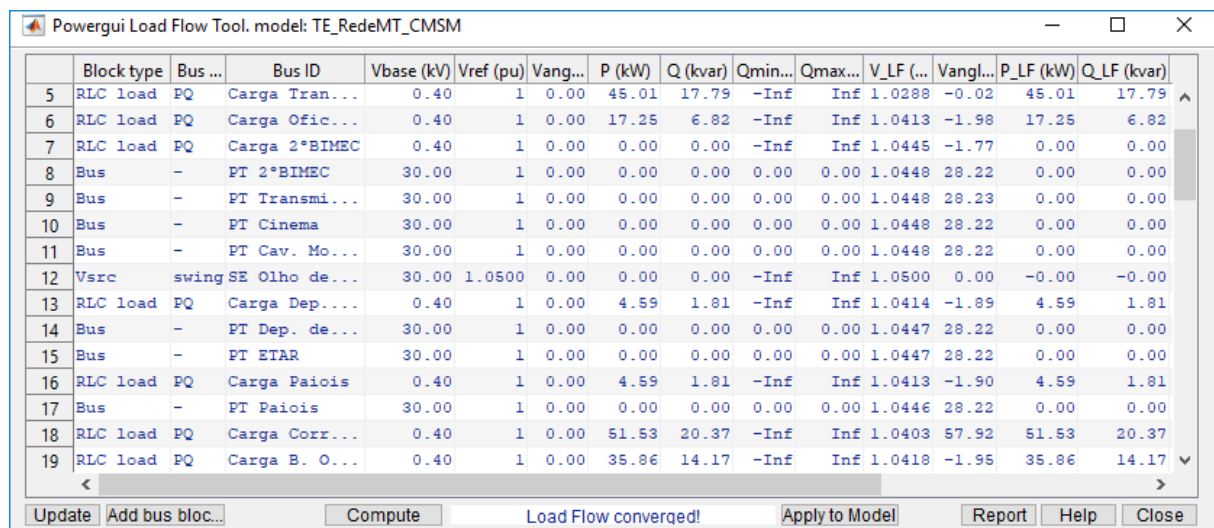
Na definição das coordenadas X e Y, decide-se desprezar a flecha da linha aérea ($Y_{tower} = Y_{min}$), tendo-se verificado que a sua influência nos resultados é pouco significativa. Desta forma e com base nas distâncias especificadas, as coordenadas X e Y de cada fase/condutor são as seguintes:

- **Fase/condutor 1:** $X = 1,035 \text{ m} / Y_{tower} = Y_{min} = 10 \text{ m}$;
- **Fase/condutor 2:** $X = -1,035 \text{ m} / Y_{tower} = Y_{min} = 10,75 \text{ m}$;
- **Fase/condutor 3:** $X = 1,035 \text{ m} / Y_{tower} = Y_{min} = 11,5 \text{ m}$;

Inserindo na ferramenta os parâmetros acima especificados para a linha aérea em questão, tem-se como *output* os valores das componentes direta e homopolar da resistência, indutância e capacitância em unidades por quilómetro. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.11 na secção 2.2.3.

B.2.2 Load Flow

Na análise do comportamento da rede em regime estacionário recorre-se à ferramenta de análise do TE do *Simulink*, designada de *Load Flow* [18]. Na Figura B.11 apresenta-se a respetiva interface gráfica.



	Block type	Bus ...	Bus ID	Vbase (kV)	Vref (pu)	Vang...	P (kW)	Q (kvar)	Qmin...	Qmax...	V_LF (...)	Vangl...	P_LF (kW)	Q_LF (kvar)
5	RLC load	PQ	Carga Tran...	0.40	1	0.00	45.01	17.79	-Inf	Inf	1.0288	-0.02	45.01	17.79
6	RLC load	PQ	Carga Ofic...	0.40	1	0.00	17.25	6.82	-Inf	Inf	1.0413	-1.98	17.25	6.82
7	RLC load	PQ	Carga 2°BIMEC	0.40	1	0.00	0.00	0.00	-Inf	Inf	1.0445	-1.77	0.00	0.00
8	Bus	-	PT 2°BIMEC	30.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0448	28.22	0.00	0.00
9	Bus	-	PT Transmi...	30.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0448	28.23	0.00	0.00
10	Bus	-	PT Cinema	30.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0448	28.22	0.00	0.00
11	Bus	-	PT Cav. Mo...	30.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0448	28.22	0.00	0.00
12	Vsrc	swing	SE Olho de...	30.00	1.0500	0.00	0.00	0.00	-Inf	Inf	1.0500	0.00	-0.00	-0.00
13	RLC load	PQ	Carga Dep....	0.40	1	0.00	4.59	1.81	-Inf	Inf	1.0414	-1.89	4.59	1.81
14	Bus	-	PT Dep. de...	30.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0447	28.22	0.00	0.00
15	Bus	-	PT ETAR	30.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0447	28.22	0.00	0.00
16	RLC load	PQ	Carga Paiois	0.40	1	0.00	4.59	1.81	-Inf	Inf	1.0413	-1.90	4.59	1.81
17	Bus	-	PT Paiois	30.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0446	28.22	0.00	0.00
18	RLC load	PQ	Carga Corr...	0.40	1	0.00	51.53	20.37	-Inf	Inf	1.0403	57.92	51.53	20.37
19	RLC load	PQ	Carga B. O...	0.40	1	0.00	35.86	14.17	-Inf	Inf	1.0418	-1.95	35.86	14.17

Figura B.11: Interface gráfica da ferramenta *Load Flow*

Após a construção do modelo da rede e a definição do tipo de cada um dos nós (balanço, PQ ou PV) que a compõem, o *Load Flow* calcula a solução do TE, tendo por base o método iterativo de Newton-Raphson. Os resultados relativos às tensões nos barramentos e às potências consumidas são apresentados diretamente na interface, sendo que o *Load Flow* ainda gera como *output* um ficheiro *excel* onde constam também as potências transitadas em cada ramal, as potências geradas e injetadas em cada nó e as perdas totais na rede.

B.2.3 Machine Initialization

Quando no modelo da rede são integradas máquinas rotativas (síncronas ou assíncronas), requer-se a utilização da ferramenta *Machine Initialization*, a qual permite inicializar os modelos de geradores e/ou motores e ajustar os respectivos parâmetros de funcionamento às características da rede em que estão inseridos. Na Figura B.12 apresenta-se a interface gráfica desta ferramenta e visualiza-se, a título de exemplo, os parâmetros associados ao gerador síncrono referente ao modelo da Central de Biomassa.

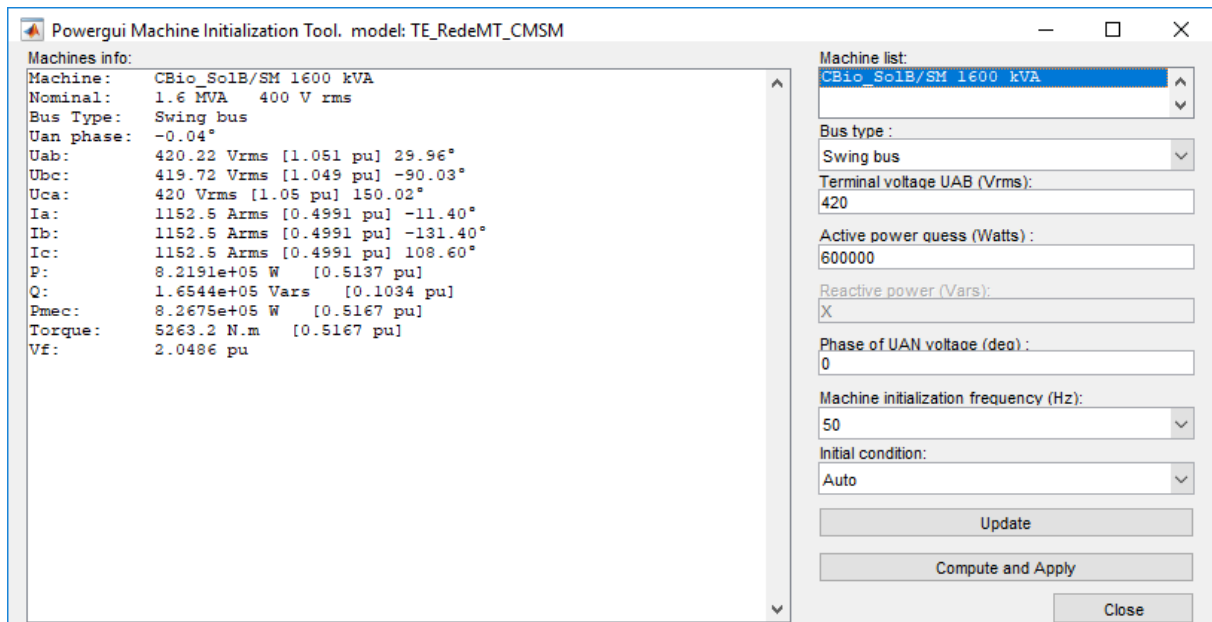
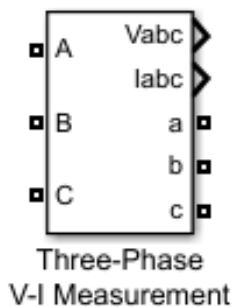


Figura B.12: Interface gráfica da ferramenta *Machine Initialization*

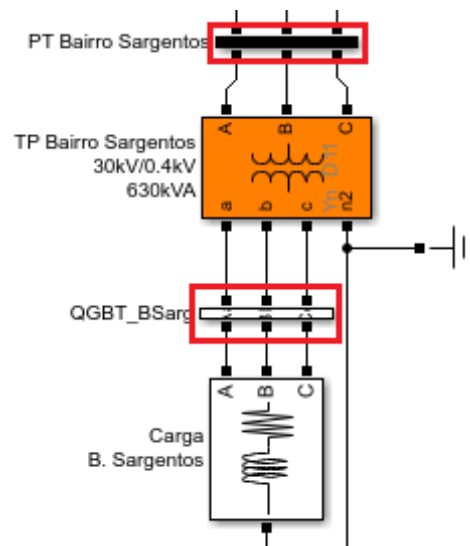
No separador *Bus Type* define-se o modo de funcionamento do gerador, sendo possível escolher se este se comporta como nó de balanço ou *swing bus* (módulo e argumento da tensão especificados), nó PV (potência ativa gerada e módulo da tensão aos terminais especificados) ou nó PQ (potências ativa e reativa geradas especificadas). Após definido o *Bus Type* e especificadas as respetivas variáveis independentes, a ferramenta calcula as condições ótimas de funcionamento da máquina em regime estacionário e substitui de forma automática os valores de referência da tensão aos terminais do gerador e da potência mecânica do grupo turbina-gerador (*inputs* do sistema de excitação e da turbina/regulador de velocidade, respetivamente) pelos valores calculados para o novo cenário de funcionamento.

B.2.4 Cálculo das correntes de curto-circuito

No *Simulink*, as correntes de curto-circuito são visualizadas através da integração de blocos modeladores de multímetros trifásicos no modelo da rede. Na Figura B.13 representa-se o formato *default* do bloco mencionado e a forma como é integrado no modelo (destacado a vermelho).



(a) Representação gráfica



(b) Integração no modelo

Figura B.13: Bloco *Simulink* modelador de multímetro trifásico

Este bloco modelador permite fazer a aquisição de sinais de tensão e corrente nos diversos pontos da rede e traçar oscilografias, a partir das quais se visualiza a evolução dos sinais durante o tempo de simulação. A título de exemplo, representa-se na Figura B.14 oscilografias de tensão e de corrente numa situação de curto-circuito na rede. Neste caso, define-se que em $t = 0,3$ ocorre o defeito, sendo visível o aumento súbito da corrente e a queda imediata da tensão no momento pós-defeito.

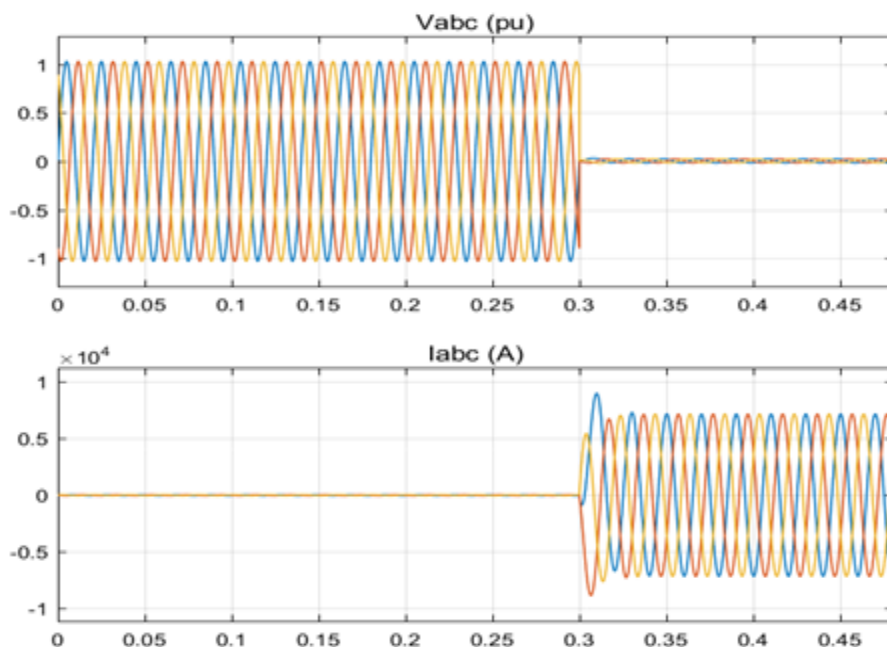
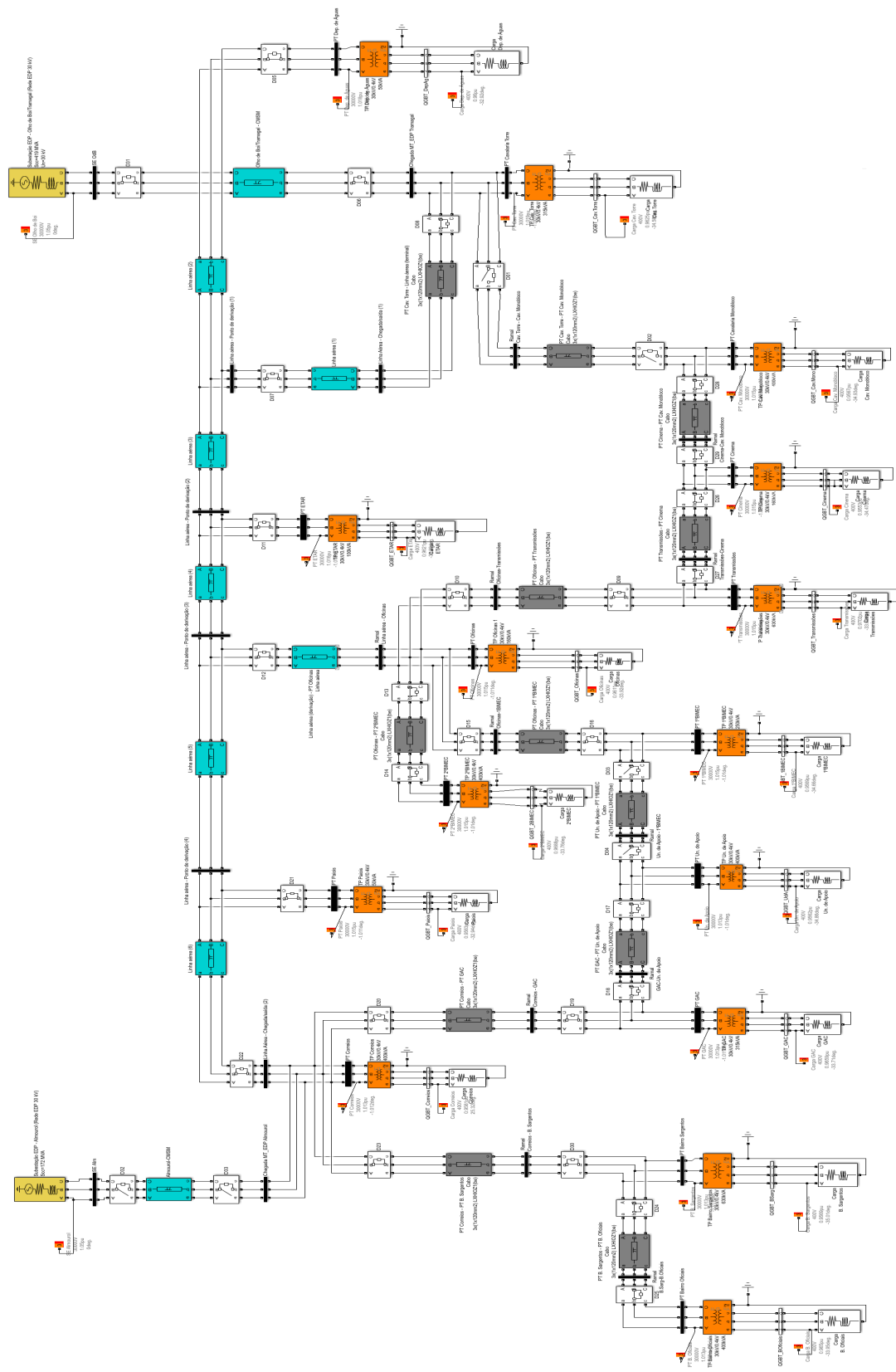


Figura B.14: Oscilografias de tensão e corrente no *Simulink*

Desta forma, o método de cálculo dos valores das correntes de curto-circuito e das tensões pós-defeito consiste na visualização das oscilografias geradas, sendo que os respetivos valores eficazes são calculados através das funcionalidades gráficas e matemáticas do *Simulink*.

B.3 Modelo completo



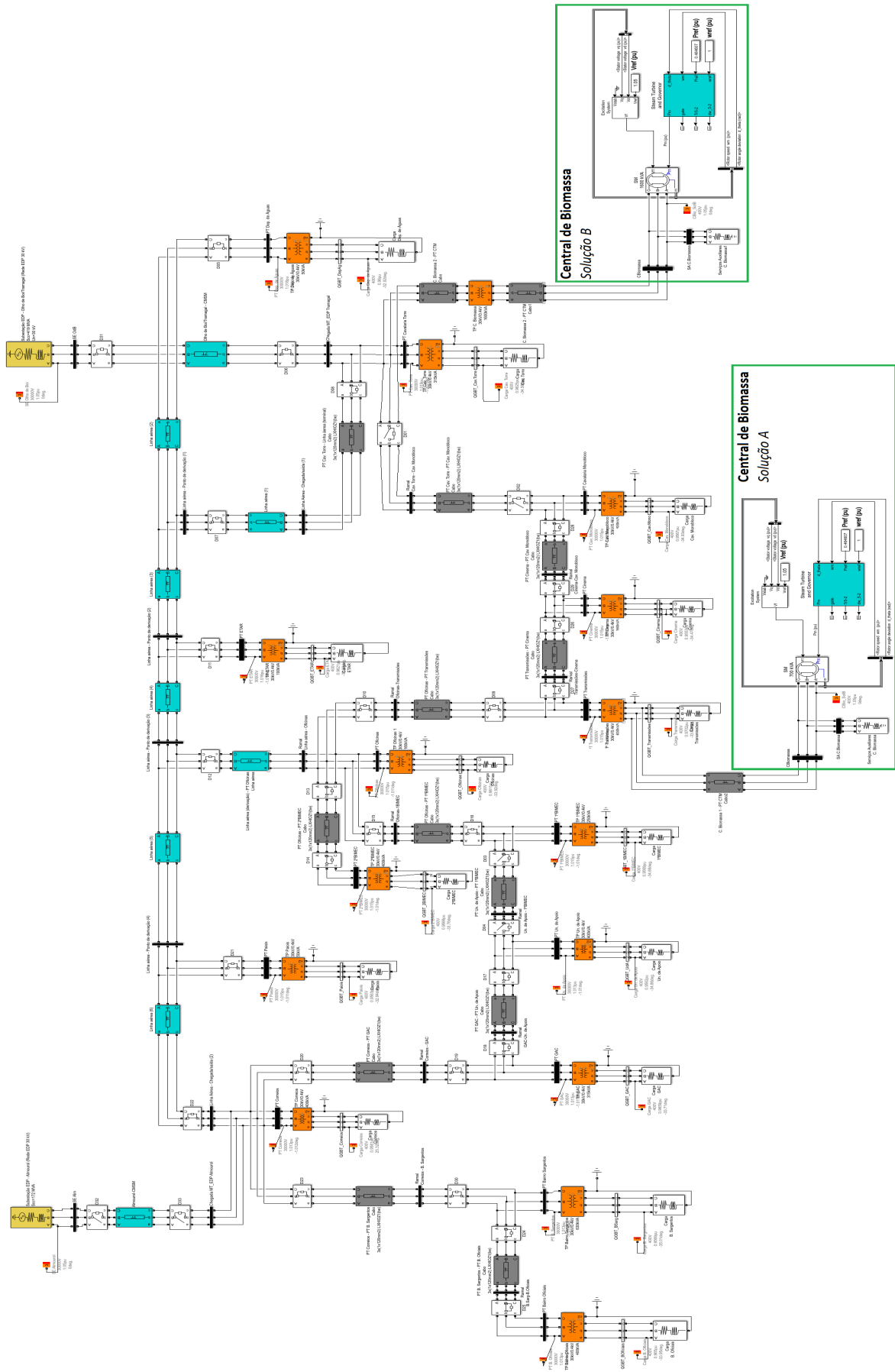


Figura B.16: Modelo *Simulink* completo da rede do CMSM com a integração da Central de Biomassa

Anexo C

Propriedades das Redes de Petri

No seguimento da introdução às RdP efetuada na na secção 5.1, descrevem-se neste anexo as suas propriedades dinâmicas e estruturais. A validação das RdP e, conseqüentemente, do funcionamento lógico dos automatismos é conseguida através da verificação destas propriedades.

C.1 Propriedades dinâmicas

• Alcançabilidade

Definição 5: Para uma Rede de Petri $M = \{P, T, I, O, \mu_0\}$, a alcançabilidade traduz-se no conjunto de todas as marcações acessíveis, verificando se a marcação $\mu' \in R(M, \mu_0)$. A função R representa todas as marcações acessíveis a partir de uma marcação inicial μ_0 .

• Limitação

Uma RdP diz-se k -limitada se, para todo o espaço de estados, o número de marcas em qualquer um dos seus lugares não exceder o número inteiro k .

Definição 6: Um lugar $p_i \in P$ de uma RdP $M = \{P, T, I, O, \mu_0\}$ é k -limitada se para qualquer marcação $\mu' \in R(M)$, $\mu'(p_i) \leq k$, considerando-se a RdP k -limitada se todos os lugares garantirem esta condição.

• Segurança

Uma RdP é considerada segura (binária) se, para todo o espaço de estados de uma certa marcação inicial μ_0 , o número de marcas de cada lugar não exceder $k = 1$.

Definição 7: Um lugar $p_i \in P$ de uma RdP $M = \{P, T, I, O, \mu_0\}$ é considerado seguro se $\forall \mu' \in R(M, \mu_0)$, $\mu'(p_i) \leq 1$. Uma RdP é segura se todos os lugares garantirem esta condição.

• Conservação

Uma RdP diz-se estritamente conservativa se o número total de marcas permanecer constante e igual ao seu valor inicial. Uma RdP é conservativa se a soma ponderada de todas as marcações alcançáveis for constante.

Definição 8: Uma RdP $M = \{P, T, I, O, \mu_0\}$ é estritamente conservativa se $\forall \mu' \in R(M)$:

$$\sum_{p_i \in P_i} \mu'(p_i) = \sum_{p_i \in P_i} \mu(p_i) \quad (\text{C.1})$$

Definição 9: Uma RdP $M = \{P, T, I, O, \mu_0\}$ é conservativa, em concordância com um vetor de peso w , $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)$, $n = |P|$ se $\forall \mu' \in R(M)$:

$$\sum_{p_i \in P_i} w_i \cdot \mu'(p_i) = \sum_{p_i \in P_i} w_i \cdot \mu(p_i) \quad (\text{C.2})$$

• Vivacidade

A vivacidade está relacionada com a ausência de bloqueios (*deadlocks*) no funcionamento da RdP, dizendo-se que uma RdP é viva se, partindo de qualquer marcação, qualquer transição for disparável através de uma qualquer sequência de transições.

Definição 10: A propriedade de vivacidade de uma RdP $M = \{P, T, I, O, \mu_0\}$ é classificada em quatro níveis, sendo considerada viva se todas as suas transições forem de nível 4.

- Nível 0: A transição t_j é viva de nível 0 se nunca for transposta;
- Nível 1: A transição t_j é viva de nível 1 se for potencialmente disparável, existindo uma marcação μ' que permite a transposição de t_j ;
- Nível 2: A transição t_j é viva de nível 2 se para qualquer número inteiro n , existir uma sequência que permita a transposição de t_j n vezes;
- Nível 3: A transição t_j é viva de nível 3 se existir uma sequência infinita de disparos para a qual t_j é transposta infinitas vezes;
- Nível 4: A transição t_j é viva de nível 4 se para qualquer marcação existir uma sequência de transições que permita a transposição de t_j .

• Reversibilidade

Uma RdP $M = \{P, T, I, O, \mu_0\}$ é considerada reversível se $\forall \mu' \in R(M, \mu_0)$ se existir uma sequência de transições que devolva a RdP à marcação inicial μ_0 .

C.2 Propriedades estruturais

Na análise das propriedades estruturais efetua-se a verificação dos invariantes de lugares e de transições das RdP, sendo a sua análise determinante para a validação do correto funcionamento do sistema modelado através de RdP, nomeadamente ao nível de eventos que estejam em concorrência ou que não

possam ocorrer simultaneamente. De seguida, efetua-se uma formulação matemática no sentido de compreender o significado dos invariantes de lugares e de transições.

Observando a seguinte equação associada à dinâmica de evolução da RdP $M = \{P, T, I, O, \mu_0\}$,

$$\mu_{i+k} = \mu_i + C \cdot \bar{s}, \quad (\text{C.3})$$

onde C é a matriz de incidências da RdP e \bar{s} representa um conjunto de sequências de transições, e considerando os vetores característicos f e σ de dimensões

$$\mathbf{dim}(f) = \mathbf{dim}(P), \quad \mathbf{dim}(\sigma) = \mathbf{dim}(T) \quad (\text{C.4})$$

A equação C.3 pode ser reescrita na seguinte forma:

$$f^T \cdot \mu_{i+k} = f^T \cdot \mu_i + f^T \cdot C \cdot \bar{s} \quad (\text{C.5})$$

Assumindo $f^T \cdot C = 0$, obtém-se:

$$f^T \cdot \mu_{i+k} = f^T \cdot \mu_i = cte, \quad \forall i \in \mathbb{N} \quad (\text{C.6})$$

Por outro lado, ao substituir na equação C.3 \bar{s} por σ e assumindo que $C \cdot \sigma = 0$, obtém-se:

$$\mu_{i+k} = \mu_i = cte, \quad \forall i \in \mathbb{N} \quad (\text{C.7})$$

Os vetores f e σ , não nulos e que permitem resolver as equações anteriores, definem, respetivamente, os invariantes de lugares e os invariantes de transições da RdP M .

Definição 11: Definem-se como invariantes de lugares os vetores f que sejam solução da equação $f^T \cdot C = 0$, $f \neq 0$.

Os invariantes de lugares representam um conjunto de lugares de uma RdP cuja soma das marcações permanece constante para todo o espaço de estados, permitindo verificar a exclusividade mútua entre lugares e certificar que eventos que não possam ocorrer simultaneamente são mutuamente exclusivos.

Definição 12: Definem-se como invariantes de transições os vetores σ que sejam solução da equação $C \cdot \sigma = 0$, $\sigma \neq 0$.

Os invariantes de transições permitem a verificação de sequências de transições repetitivas, sendo utilizados na determinação de comportamentos cíclicos e repetitivos de uma RdP e na análise da sua reversibilidade.

Anexo D

Análise estrutural das Redes de Petri

Neste anexo apresentam-se os resultados obtidos com a análise estrutural das RdP dos automatismos que são integrados em IAMR (ver Capítulo 5), analisando-se igualmente a RdP completa do automatismo de IAMR. Para tal, são utilizadas as ferramentas de *Reachability analysis* e *Structural analysis* do software TINA 3.4.4 na análise das propriedades dinâmicas e estruturais das RdP.

D.1 Análise Estrutural do automatismo de AOR

Na secção 5.2.2 encontra-se detalhado o AOR integrado no automatismo de IAMR. Este AOR é especificado tendo por base a topologia da micro-rede do CMSM e com o intuito de realizar as operações de recurso associadas ao processo de interligação da micro-rede à RESP.

Na Figura D.1 apresenta-se a RdP de AOR utilizada, estando na sua estrutura considerados os módulos A e B de ligação à RESP, associados respetivamente às operações de recurso com a micro-rede em ilha e em *blackout*, bem como as interligações de AOR com os autómatos modeladores dos barramentos de receção (1.B e 2.B) e das linhas de chegada da RESP (1.L e 2.L), representadas respetivamente a azul e verde. No sentido de permitir a reinicialização da RdP de AOR, adicionaram-se as transições *aux1* e *aux2*.

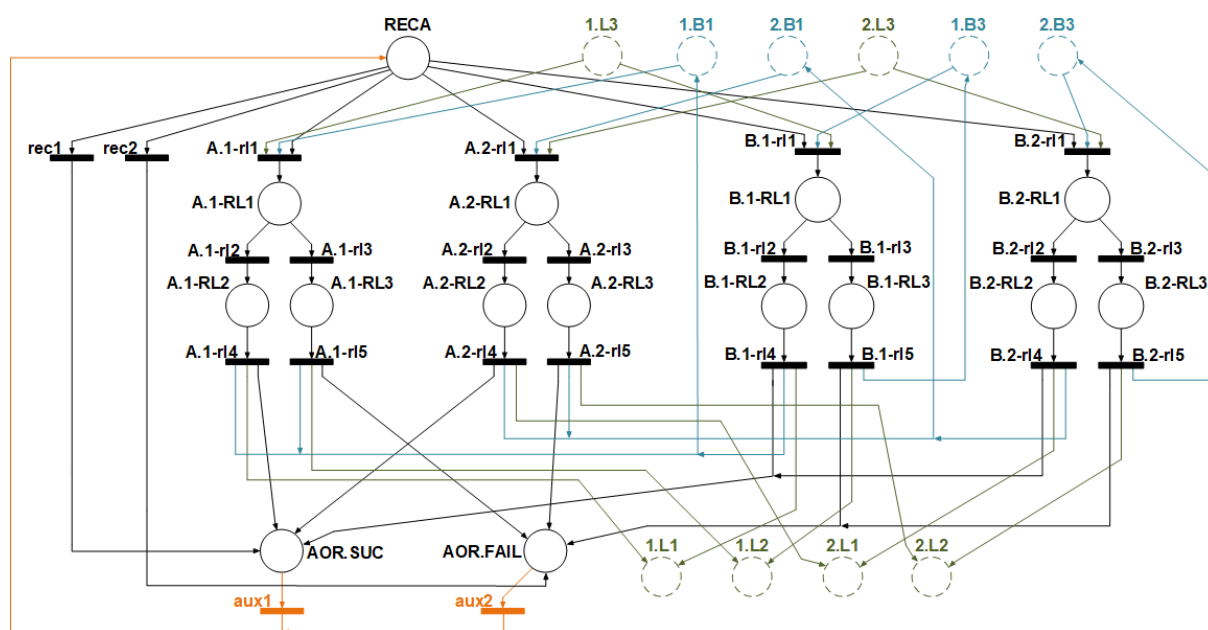


Figura D.1: RdP utilizada na análise estrutural de AOR

Na Tabela D.1 encontram-se os resultados da análise estrutural da RdP de AOR, onde consta a verificação das propriedades dinâmicas (limitação, vivacidade e reversibilidade) e a lista de invariantes de lugares e de transições da RdP.

Tabela D.1: Análise estrutural da RdP de AOR - Propriedades dinâmicas e estruturais

Estrutura		Propriedades dinâmicas				
Lugares	Transições	Estados	Transições	Limitada	Viva	Reversível
29	50	576	4512	Sim	Sim	Sim
Invariantes de Lugares						
1 - {1.L1}{1.L2}{1.L3}{1.L4}{A.1-RL1}{A.1-RL2}{A.1-RL3}{B.1-RL1}{B.1-RL2}{B.1-RL3}						
2 - {1.B1}{1.B2}{1.B3}{A.1-RL1}{A.1-RL2}{A.1-RL3}{B.1-RL1}{B.1-RL2}{B.1-RL3}						
3 - {2.L1}{2.L2}{2.L3}{2.L4}{A.2-RL1}{A.2-RL2}{A.2-RL3}{B.2-RL1}{B.2-RL2}{B.2-RL3}						
4 - {2.B1}{2.B2}{2.B3}{A.2-RL1}{A.2-RL2}{A.2-RL3}{B.2-RL1}{B.2-RL2}{B.2-RL3}						
5 - {A.1-RL1}{A.1-RL2}{A.1-RL3}{A.2-RL1}{A.2-RL2}{A.2-RL3}{B.1-RL1}{B.1-RL2}{B.1-RL3}{B.2-RL1}{B.2-RL2}{B.2-RL3}{AOR.FAIL}{AOR.SUC}{RECA}						
Invariantes de Transições						
1 - {aux1}{rec1}		21 - {2.11}{2.16}{2.18}{B.2-rl1}{B.2-rl3}{B.2-rl5}{aux2}				
2 - {aux2}{rec2}		22 - {2.15}{2.16}{B.2-rl1}{B.2-rl3}{B.2-rl5}{aux2}				
3 - {1.b1}{1.b2}		23 - {1.11}{1.16}{1.18}{B.1-rl1}{B.1-rl3}{B.1-rl5}{aux2}				
4 - {1.b2}{1.b3}{1.b5}		24 - {1.15}{1.16}{B.1-rl1}{B.1-rl3}{B.1-rl5}{aux2}				
5 - {1.b3}{1.b4}		25 - {1.b2}{1.b5}{1.12}{1.15}{1.16}{B.1-rl1}{B.1-rl2}{B.1-rl4}{aux1}				
6 - {1.11}{1.12}		26 - {1.b4}{1.12}{1.15}{1.16}{B.1-rl1}{B.1-rl2}{B.1-rl4}{aux1}				
7 - {1.11}{1.14}{1.18}		27 - {1.12}{1.15}{1.16}{A.1-rl1}{A.1-rl2}{A.1-rl4}{aux1}				
8 - {1.14}{1.15}		28 - {1.11}{1.16}{1.18}{A.1-rl1}{A.1-rl3}{A.1-rl5}{aux2}				
9 - {1.12}{1.13}{1.15}{1.16}		29 - {1.15}{1.16}{A.1-rl1}{A.1-rl3}{A.1-rl5}{aux2}				
10 - {1.13}{1.16}{1.18}		30 - {1.b2}{1.b5}{1.16}{1.18}{B.1-rl1}{B.1-rl2}{B.1-rl4}{aux1}				
11 - {1.16}{1.17}		31 - {1.b4}{1.16}{1.18}{B.1-rl1}{B.1-rl2}{B.1-rl4}{aux1}				
12 - {2.b1}{2.b2}		32 - {1.16}{1.18}{A.1-rl1}{A.1-rl2}{A.1-rl4}{aux1}				
13 - {2.b2}{2.b3}{2.b5}		33 - {2.b2}{2.b5}{2.12}{2.15}{2.16}{B.2-rl1}{B.2-rl2}{B.2-rl4}{aux1}				
14 - {2.b3}{2.b4}		34 - {2.b4}{2.12}{2.15}{2.16}{B.2-rl1}{B.2-rl2}{B.2-rl4}{aux1}				
15 - {2.16}{2.17}		35 - {2.12}{2.15}{2.16}{A.2-rl1}{A.2-rl2}{A.2-rl4}{aux1}				
16 - {2.13}{2.16}{2.18}		36 - {2.11}{2.16}{2.18}{A.2-rl1}{A.2-rl3}{A.2-rl5}{aux2}				
17 - {2.11}{2.12}		37 - {2.15}{2.16}{A.2-rl1}{A.2-rl3}{A.2-rl5}{aux2}				
18 - {2.11}{2.14}{2.18}		38 - {2.b2}{2.b5}{2.16}{2.18}{B.2-rl1}{B.2-rl2}{B.2-rl4}{aux1}				
19 - {2.14}{2.15}		39 - {2.b4}{2.16}{2.18}{B.2-rl1}{B.2-rl2}{B.2-rl4}{aux1}				
20 - {2.12}{2.13}{2.15}{2.16}		40 - {2.16}{2.18}{A.2-rl1}{A.2-rl2}{A.2-rl4}{aux1}				

D.2 Análise Estrutural do automatismo de GI

Na análise do automatismo de GI, integrado em IAMR com o intuito de monitorizar o estado da micro-rede e efetuar a gestão das operações de recurso associados ao processo de interligação à RESP, utiliza-se a RdP representada na Figura 5.9 da secção 5.2.3. Na RdP de GI estão consideradas as ligações com o autómato modelador da micro-rede (MR).

Os resultados da análise estrutural da RdP de GI encontram-se detalhados na Tabela D.2.

Tabela D.2: Análise estrutural da RdP de GI - Propriedades dinâmicas e estruturais

Estrutura		Propriedades dinâmicas				
Lugares	Transições	Estados	Transições	Limitada	Viva	Reversível
11	23	14	39	Sim	Sim	Sim
Invariantes de Lugares						
1 - {GI.REP}{GI.START}{GI1}{GI2.A}{GI2.B}{GI3}						
2 - {GI1}{GI2.A}{GI2.B}{GI3}{MR1}{MR2}{MR3}{MR4}{MR5}						
Invariantes de Transições						
1 - {gi3}{gi6.B}			14 - {mr1}{mr2}			
2 - {gi2}{gi5}{gi8}			15 - {gi1}{gi3}{gi7.B}{mr1}{mr10}{mr4}			
3 - {gi2}{gi4}{gi6.A}			16 - {gi2}{gi5}{gi9}{mr1}{mr10}{mr11}			
4 - {mr7}{mr8}			17 - {mr1}{mr10}{mr11}{mr4}			
5 - {mr5}{mr6}			18 - {gi2}{gi5}{gi9}{mr1}{mr6}{mr7}			
6 - {gi1}{gi3}{gi7.B}{mr12}			19 - {mr1}{mr4}{mr6}{mr7}			
7 - {mr10}{mr9}			20 - {gi1}{gi2}{gi4}{gi7.A}{mr12}{mr3}{mr9}			
8 - {mr11}{mr12}			21 - {gi1}{gi2}{gi4}{gi7.A}{mr3}{mr5}{mr8}			
9 - {gi1}{gi2}{gi3}{gi5}{gi7.B}{gi9}{mr1}{mr10}			22 - {mr12}{mr2}{mr3}{mr9}			
10 - {gi1}{gi3}{gi7.B}{mr10}{mr5}{mr8}			23 - {mr2}{mr3}{mr5}{mr8}			
11 - {mr10}{mr11}{mr5}{mr8}			24 - {gi2}{gi5}{gi9}{mr3}			
12 - {mr12}{mr6}{mr7}{mr9}			25 - {mr3}{mr4}			
13 - {gi1}{gi2}{gi4}{gi7.A}{mr1}						

D.3 Análise Estrutural do automatismo de IAMR

A modelação do automatismo de IAMR através de RdP encontra-se detalhada no Capítulo 5. Na Figura D.2 apresenta-se a RdP completa de IAMR, onde são incorporados os automatismos de AOR e de GI, assim como os autómatos modeladores da micro-rede e dos elementos envolvidos no processo de interligação, referentes aos barramentos de receção e às linhas de chegada da RESP.

Os resultados da análise estrutural da RdP de IAMR são apresentados nas Tabelas D.3 e D.4.

Tabela D.3: Análise estrutural da RdP de IAMR - Propriedades dinâmicas e invariantes de lugares

Estrutura		Propriedades dinâmicas				
Lugares	Transições	Estados	Transições	Limitada	Viva	Reversível
40	71	9576	92976	Sim	Sim	Sim
Invariantes de Lugares						
1 - {1.L1}{1.L2}{1.L3}{1.L4}{A.1-RL1}{A.1-RL2}{A.1-RL3}{B.1-RL1}{B.1-RL2}{B.1-RL3}						
2 - {1.B1}{1.B2}{1.B3}{A.1-RL1}{A.1-RL2}{A.1-RL3}{B.1-RL1}{B.1-RL2}{B.1-RL3}						
3 - {2.L1}{2.L2}{2.L3}{2.L4}{A.2-RL1}{A.2-RL2}{A.2-RL3}{B.2-RL1}{B.2-RL2}{B.2-RL3}						
4 - {2.B1}{2.B2}{2.B3}{A.2-RL1}{A.2-RL2}{A.2-RL3}{B.2-RL1}{B.2-RL2}{B.2-RL3}						
5 - {A.1-RL1}{A.1-RL2}{A.1-RL3}{A.2-RL1}{A.2-RL2}{A.2-RL3}{B.1-RL1}{B.1-RL2}{B.1-RL3}{B.2-RL1}{B.2-RL2}{B.2-RL3}{AOR.FAIL}{AOR.SUC}{RECA}{GI1}{GI3}{MR1}{MR2}{MR3}{MR4}{MR5}						
6 - {A.1-RL1}{A.1-RL2}{A.1-RL3}{A.2-RL1}{A.2-RL2}{A.2-RL3}{B.1-RL1}{B.1-RL2}{B.1-RL3}{B.2-RL1}{B.2-RL2}{B.2-RL3}{AOR.FAIL}{AOR.SUC}{GI.REP}{RECA}{GI.START}{GI1}{GI3}						
7 - {GI1}{GI2.A}{GI2.B}{GI3}{MR1}{MR2}{MR3}{MR4}{MR5}						
8 - {GI.REP}{GI.START}{GI1}{GI2.A}{GI2.B}{GI3}						

Tabela D.4: Análise estrutural da RdP de IAMR - Invariantes de transições

Invariantes de Transições	
1 - {1.16}{1.17}	44 - {mr1}{mr10}{mr11}{mr4}
2 - {1.13}{1.16}{1.18}	45 - {mr1}{mr4}{mr6}{mr7}
3 - {1.11}{1.12}	46 - {mr12}{mr2}{mr3}{mr9}
4 - {1.11}{1.14}{1.18}	47 - {mr2}{mr3}{mr5}{mr8}
5 - {1.14}{1.15}	48 - {mr3}{mr4}
6 - {1.12}{1.13}{1.15}{1.16}	49 - {gi1}{gi3}{rec1}{gi7.B}{mr12}
7 - {2.16}{2.17}	50 - {gi1}{gi3}{rec1}{gi7.B}{mr10}{mr5}{mr8}
8 - {2.13}{2.16}{2.18}	51 - {gi1}{gi3}{rec1}{gi7.B}{mr10}{mr1}{mr4}
9 - {2.11}{2.12}	52 - {1.11}{1.18}{1.16}{B.1-rl1}{B.1-rl3}{B.1-rl5}{gi6.B}{gi3}
10 - {2.11}{2.14}{2.18}	53 - {1.15}{1.16}{B.1-rl1}{B.1-rl3}{B.1-rl5}{gi6.B}{gi3}
11 - {2.14}{2.15}	54 - {1.11}{1.18}{1.16}{A.1-rl1}{A.1-rl3}{A.1-rl5}{gi6.A}{gi2}{gi4}
12 - {2.12}{2.13}{2.15}{2.16}	55 - {1.15}{1.16}{A.1-rl1}{A.1-rl3}{A.1-rl5}{gi6.A}{gi2}{gi4}
13 - {1.b3}{1.b4}	56 - {gi3}{rec2}{gi6.B}
14 - {1.b2}{1.b3}{1.b5}	57 - {gi1}{gi2}{gi4}{rec1}{gi7.A}{mr1}
15 - {1.b1}{1.b2}	58 - {gi1}{gi2}{gi4}{rec1}{gi7.A}{mr5}{mr8}{mr3}
16 - {2.b2}{2.b3}{2.b5}	59 - {gi1}{gi2}{gi4}{rec1}{gi7.A}{mr9}{mr12}{mr3}
17 - {2.b1}{2.b2}	60 - {gi2}{gi4}{rec2}{gi6.A}
18 - {2.b3}{2.b4}	61 - {gi2}{gi5}{gi9}{mr3}
19 - {1.b2}{1.b5}{1.12}{1.15}{1.16}{B.1-rl1}{B.1-rl2}{B.1-rl4}{gi7.B}{gi1}{mr12}{gi3}	62 - {gi2}{gi5}{gi9}{mr7}{mr6}{mr1}
20 - {1.b2}{1.b5}{1.12}{1.15}{1.16}{B.1-rl1}{B.1-rl2}{B.1-rl4}{gi7.B}{gi1}{mr10}{mr5}{mr8}{gi3}	63 - {gi2}{gi5}{gi9}{mr11}{mr10}{mr1}
21 - {1.b2}{1.b5}{1.16}{B.1-rl1}{B.1-rl2}{B.1-rl4}{gi7.B}{gi1}{mr10}{mr1}{mr4}{gi3}	64 - {gi2}{gi5}{gi8}
22 - {1.b4}{1.12}{1.15}{1.16}{B.1-rl1}{B.1-rl2}{B.1-rl4}{gi7.B}{gi1}{mr12}{gi3}	65 - {2.b2}{2.b5}{2.12}{2.15}{2.16}{B.2-rl1}{B.2-rl2}{B.2-rl4}{gi7.B}{gi1}{mr12}{gi3}
23 - {1.b4}{1.12}{1.15}{1.16}{B.1-rl1}{B.1-rl2}{B.1-rl4}{gi7.B}{gi1}{mr10}{mr5}{mr8}{gi3}	66 - {2.b2}{2.b5}{2.12}{2.15}{2.16}{B.2-rl1}{B.2-rl2}{B.2-rl4}{gi7.B}{gi1}{mr10}{mr5}{mr8}{gi3}
24 - {1.b4}{1.12}{1.15}{1.16}{B.1-rl1}{B.1-rl2}{B.1-rl4}{gi7.B}{gi1}{mr10}{mr1}{mr4}{gi3}	67 - {2.b2}{2.b5}{2.12}{2.15}{2.16}{B.2-rl1}{B.2-rl2}{B.2-rl4}{gi7.B}{gi1}{mr10}{mr1}{mr4}{gi3}
25 - {1.12}{1.15}{1.16}{A.1-rl1}{A.1-rl2}{A.1-rl4}{gi7.A}{gi1}{mr1}{gi2}{gi4}	68 - {2.b4}{2.12}{2.15}{2.16}{B.2-rl1}{B.2-rl2}{B.2-rl4}{gi7.B}{gi1}{mr12}{gi3}
26 - {1.12}{1.15}{1.16}{A.1-rl1}{A.1-rl2}{A.1-rl4}{gi7.A}{gi1}{mr5}{mr8}{mr3}{gi2}{gi4}	69 - {2.b4}{2.12}{2.15}{2.16}{B.2-rl1}{B.2-rl2}{B.2-rl4}{gi7.B}{gi1}{mr10}{mr5}{mr8}{gi3}
27 - {1.12}{1.15}{1.16}{A.1-rl1}{A.1-rl2}{A.1-rl4}{gi7.A}{gi1}{mr9}{mr12}{mr3}{gi2}{gi4}	70 - {2.b4}{2.12}{2.15}{2.16}{B.2-rl1}{B.2-rl2}{B.2-rl4}{gi7.B}{gi1}{mr10}{mr1}{mr4}{gi3}
28 - {1.b2}{1.b5}{1.18}{1.16}{B.1-rl1}{B.1-rl2}{B.1-rl4}{gi7.B}{gi1}{mr12}{gi3}	71 - {2.12}{2.15}{2.16}{A.2-rl1}{A.2-rl2}{A.2-rl4}{gi7.A}{gi1}{mr1}{gi2}{gi4}
29 - {1.b2}{1.b5}{1.18}{1.16}{B.1-rl1}{B.1-rl2}{B.1-rl4}{gi7.B}{gi1}{mr10}{mr5}{mr8}{gi3}	72 - {2.12}{2.15}{2.16}{A.2-rl1}{A.2-rl2}{A.2-rl4}{gi7.A}{gi1}{mr5}{mr8}{mr3}{gi2}{gi4}
30 - {1.b2}{1.b5}{1.18}{1.16}{B.1-rl1}{B.1-rl2}{B.1-rl4}{gi7.B}{gi1}{mr10}{mr1}{mr4}{gi3}	73 - {2.12}{2.15}{2.16}{A.2-rl1}{A.2-rl2}{A.2-rl4}{gi7.A}{gi1}{mr9}{mr12}{mr3}{gi2}{gi4}
31 - {1.b4}{1.18}{1.16}{B.1-rl1}{B.1-rl2}{B.1-rl4}{gi7.B}{gi1}{mr12}{gi3}	74 - {2.b2}{2.b5}{2.18}{2.16}{B.2-rl1}{B.2-rl2}{B.2-rl4}{gi7.B}{gi1}{mr12}{gi3}
32 - {1.b4}{1.18}{1.16}{B.1-rl1}{B.1-rl2}{B.1-rl4}{gi7.B}{gi1}{mr10}{mr5}{mr8}{gi3}	75 - {2.b2}{2.b5}{2.18}{2.16}{B.2-rl1}{B.2-rl2}{B.2-rl4}{gi7.B}{gi1}{mr10}{mr5}{mr8}{gi3}
33 - {1.b4}{1.18}{1.16}{B.1-rl1}{B.1-rl2}{B.1-rl4}{gi7.B}{gi1}{mr10}{mr1}{mr4}{gi3}	76 - {2.b2}{2.b5}{2.18}{2.16}{B.2-rl1}{B.2-rl2}{B.2-rl4}{gi7.B}{gi1}{mr10}{mr1}{mr4}{gi3}
34 - {1.18}{1.16}{A.1-rl1}{A.1-rl2}{A.1-rl4}{gi7.A}{gi1}{mr1}{gi2}{gi4}	77 - {2.b4}{2.18}{2.16}{B.2-rl1}{B.2-rl2}{B.2-rl4}{gi7.B}{gi1}{mr12}{gi3}
35 - {1.18}{1.16}{A.1-rl1}{A.1-rl2}{A.1-rl4}{gi7.A}{gi1}{mr5}{mr8}{mr3}{gi2}{gi4}	78 - {2.b4}{2.18}{2.16}{B.2-rl1}{B.2-rl2}{B.2-rl4}{gi7.B}{gi1}{mr10}{mr5}{mr8}{gi3}
36 - {1.18}{1.16}{1.16}{A.1-rl1}{A.1-rl2}{A.1-rl4}{gi7.A}{gi1}{mr9}{mr12}{mr3}{gi2}{gi4}	79 - {2.b4}{2.18}{2.16}{B.2-rl1}{B.2-rl2}{B.2-rl4}{gi7.B}{gi1}{mr10}{mr1}{mr4}{gi3}
37 - {mr7}{mr8}	80 - {2.18}{2.16}{A.2-rl1}{A.2-rl2}{A.2-rl4}{gi7.A}{gi1}{mr1}{gi2}{gi4}
38 - {mr5}{mr6}	81 - {2.18}{2.16}{A.2-rl1}{A.2-rl2}{A.2-rl4}{gi7.A}{gi1}{mr1}{gi2}{gi4}{gi7.A}{gi1}{mr5}{mr8}{mr3}{gi2}{gi4}
39 - {mr10}{mr9}	82 - {2.18}{2.16}{A.2-rl1}{A.2-rl2}{A.2-rl4}{gi7.A}{gi1}{mr1}{gi2}{gi4}{gi7.A}{gi1}{mr9}{mr12}{mr3}{gi2}{gi4}
40 - {mr11}{mr12}	83 - {2.11}{2.18}{2.16}{B.2-rl1}{B.2-rl3}{B.2-rl5}{gi6.B}{gi3}
41 - {mr10}{mr11}{mr5}{mr8}	84 - {2.15}{2.16}{B.2-rl1}{B.2-rl3}{B.2-rl5}{gi6.B}{gi3}
42 - {mr12}{mr6}{mr7}{mr9}	85 - {2.11}{2.18}{2.16}{A.2-rl1}{A.2-rl3}{A.2-rl5}{gi6.A}{gi2}{gi4}
43 - {mr1}{mr2}	86 - {2.15}{2.16}{A.2-rl1}{A.2-rl3}{A.2-rl5}{gi6.A}{gi2}{gi4}

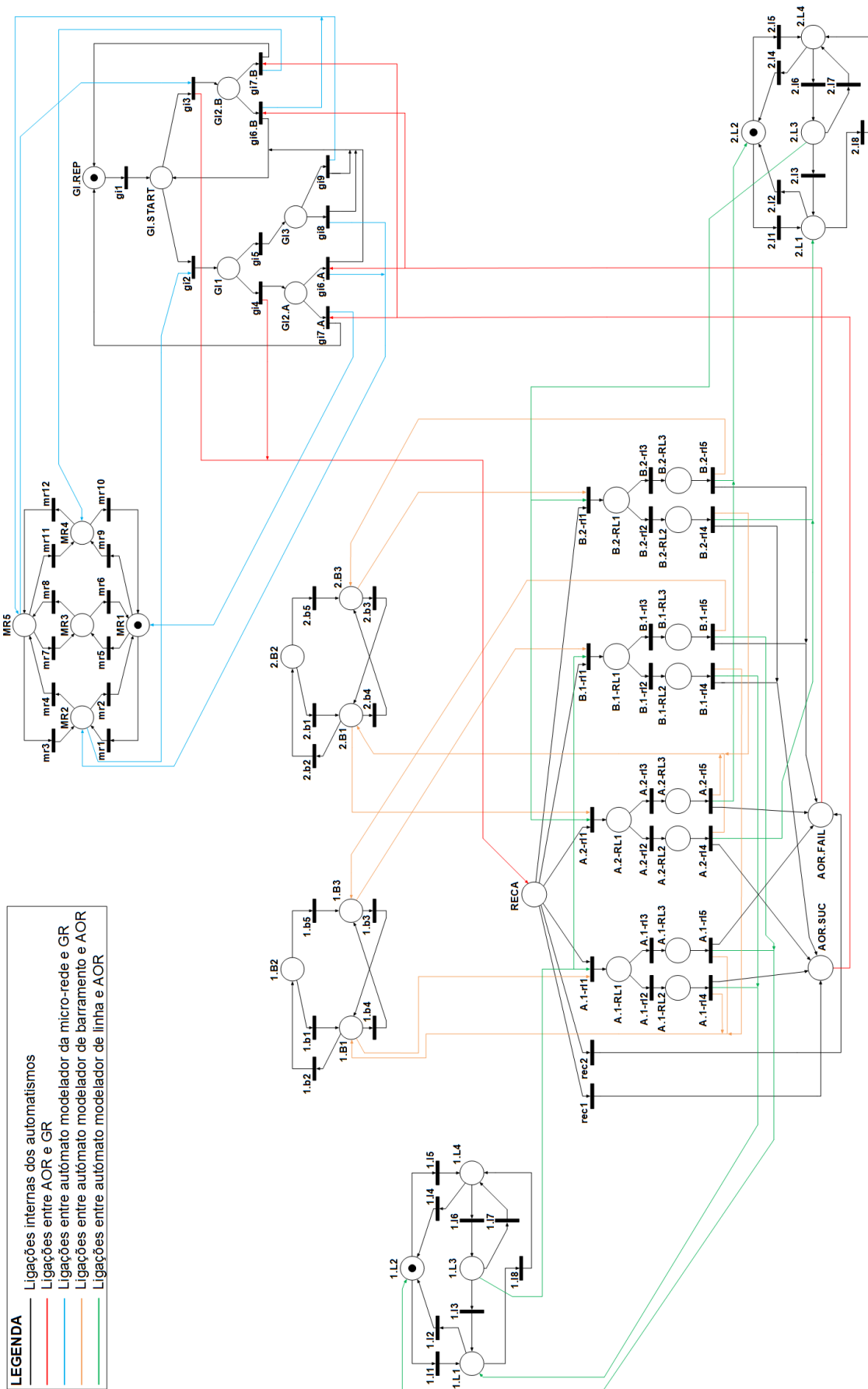


Figura D.2: Rede de Petri do automatismo de IAMR

