

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Identificação expedita de soluções de reposição de serviço em redes de transmissão

Pedro Figueiredo Nogueira

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Dr. João Abel Peças Lopes

26 de Setembro de 2014

Resumo

Os sistemas elétricos de energia têm vindo a experimentar mudanças significativas ao longo dos anos. Estas deveram-se à introdução de diferentes tecnologias de produção, como a eólica, a hídrica, a produção dispersa e outras. Também a dependência do consumidor relativamente a estes sistemas sofreu mudanças consideráveis, tendo aumentado significativamente, sendo que a ocorrência de uma falha no fornecimento de energia aos consumidores, embora possuindo uma probabilidade de ocorrência pequena, pode ter resultados catastróficos. Devido a isso, surge a necessidade de minimizar o tempo em que os consumidores ficam sem acesso a energia, após uma falha do sistema. Para que isto possa acontecer, o operador da rede deve possuir um bom conhecimento da rede e ter em mãos um plano de reposição de serviço para lhe indicar os passos a seguir durante o processo de restauro do sistema. No entanto, devido à constante mudança dos sistemas elétricos de energia e à necessidade de minimizar os estragos provocados por uma falha no sistema, os planos de reposição de serviço devem ser cuidadosamente estudados, revistos e, se necessário, reformulados.

O objetivo desta dissertação foi estudar os diversos fenómenos inerentes ao processo de reposição de serviço e elaborar uma ferramenta capaz de criar planos de reposição de serviço viáveis em que sejam considerados os diversos limites técnico e regulamentares do sistema e que possuam o menor tempo de conclusão possível.

Abstract

The energy electrical systems have experienced a significant change throughout the years. These changes are owed to the introduction of new energy production technologies, such as eolic power, hydric power and distributed generation and others. The dependence of the consumer towards these systems has also suffered a significant change, since it has increased substantially. Due to this increasing dependence, a flaw in the energy consumer supply, despite having a low probability of occurrence, can cause catastrophic consequences. Therefore, the need of minimizing the time in which the consumers are left without energy after a flaw in the system is paramount. In order to do this, the network operator needs to have good knowledge of the entire system and he requires a plan of system reposition so that he has no doubt about the steps that needs to be followed to restore the system as fast as possible, without violating any system's limits. Due to the constant change registered in electrical energy systems and because of the need to minimize the consequences caused by a flaw, the system restoration plans needs to carefully studied and revised and if necessary, remade.

The goal of this thesis is to study the different phenomenon characteristic of system reposition process and to create a tool that is capable of developing viable system restoration plans, as accurately as possible, without violating any system limits and with minimum completion time.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a todos os meus amigos e colegas que me ajudaram durante esta etapa da minha vida, sem eles esta teria sido bastante mais difícil. Entres estes gostaria de destacar Pedro Araújo, Hugo Oliveira e Gonçalo Correia, por me terem acompanhado desde o início desta fase da minha vida até à conclusão da mesma. Tenho a certeza que continuarão a acompanhar-me durante muitos e longos anos.

Gostaria também de agradecer aos meus pais, por todo o apoio e resiliência que demonstraram ao longo da minha vida académica, e por terem feito tudo para me ajudar a completar esta etapa com sucesso.

O meu agradecimento também à Madalena Cabral Ferreira que me incentivou e animou durante os maus momentos da elaboração deste documento, e que esteve sempre presente para celebrar os bons.

Ao meu orientador, Professor Doutor João Peças Lopes, pela paciência e constante disponibilidade demonstrada ao longo de todo este projeto.

A toda a comunidade académica e desportiva que me ajudou durante esta etapa, em particular aos docentes, treinadores e colegas que me permitiram conciliar a vida de estudante com a de atleta.

Por fim, gostaria de agradecer à FEUP pelos bons e maus momentos que me ajudaram a tornar na pessoa que sou hoje.

Pedro Figueiredo Nogueira

“Good people are good because they’ve come to wisdom through failure. We get very little wisdom from success.”

William Saroyan

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura da dissertação	2
2	Estado da arte	5
2.1	Sistema elétrico de energia	5
2.1.1	Introdução	5
2.1.2	Estabilidade do sistema elétrico de energia	7
2.2	Reposição do serviço	10
2.2.1	Introdução	10
2.2.2	Considerações	12
2.2.3	Problemas frequentes	14
2.2.4	Controlo na RS	19
2.2.5	Primeiro passos da RS	19
2.2.6	Passos finais da RS	20
2.2.7	Estratégias de reposição	20
2.2.8	Características das centrais de produção	22
2.3	Meta-heurísticas	24
2.3.1	Introdução	24
2.3.2	Computação Evolucionária	25
2.3.3	Enxames de partículas	29
2.3.4	Simulated annealing	32
3	Modelização do sistema e definição dos casos de estudo	35
3.1	Introdução	35
3.2	<i>Software</i>	36
3.2.1	MATLAB	36
3.2.2	MATPOWER	37
3.2.3	GUIDE	37
3.3	Funcionamento da aplicação	37
3.3.1	Introdução	37
3.3.2	Restabelecimento de serviço do esqueleto da rede	38
3.3.3	Caso A	50
3.3.4	Caso B	50

4	Resultados	55
4.1	Considerações	55
4.1.1	Considerações efetuadas devido ao <i>software</i>	55
4.1.2	Considerações efetuadas na realização da aplicação	56
4.1.3	Considerações utilizadas para os parâmetros do SEE	58
4.2	Análise do Caso A	58
4.2.1	Reestabelecimento do serviço do esqueleto da rede	59
4.2.2	Incremento de Cargas	64
4.3	Análise do Caso B	67
4.3.1	Reestabelecimento do serviço do esqueleto da rede	67
4.3.2	Incremento de Cargas	71
4.4	Comparação entre o caso A e B	74
5	Conclusões e Trabalho Futuro	77
5.1	Conclusão	77
5.2	Perspetivas futuras	78
A	Guia de utilização	81
A.1	Como utilizar a aplicação	81
A.2	Guia para codificação	85
A.2.1	Número com sete algarismos	85
A.2.2	Número com onze algarismos	86
B	Rede	89
B.1	Linhas de transmissão	90
B.2	Unidades de produção	90
B.3	Transformadores	91
B.4	Cargas	91
	Referências	93

Lista de Figuras

2.1	Estados de operação de um SEE [8]	8
2.2	Classificação dos diferentes tipos de estabilidade no SEE [1]	9
2.3	Algoritmo geral de uma meta-heurística do tipo ES	27
2.4	Influência da inércia, memória e cooperação no movimento de uma partícula i [2]	30
2.5	Ilustração da reprodução de uma partícula no EPSO [2]	32
2.6	Evolução de uma função objetivo ao longo do tempo	33
3.1	Diagrama de alto nível do funcionamento do algoritmo que restabelecimento de serviço no esqueleto de um SEE	39
3.2	Diagrama de alto nível do funcionamento da função responsável por verificar se determinada manobra não viola os limites de absorção máxima de potência reativa dos geradores	44
3.3	Diagrama de alto nível do funcionamento da função responsável por avaliar os níveis de tensão dos barramentos da rede	45
3.4	Diagrama de alto nível do funcionamento da função responsável por gerar opções que se traduzem em colocar linhas de transmissão em serviço	46
3.5	Diagrama de alto nível do funcionamento da função responsável por gerar opções que se traduzem em incrementar carga na rede	49
3.6	Diagrama de alto nível do funcionamento da função responsável por gerar opções que se traduzem em incrementar carga na rede utilizando o PSO	50
4.1	Evolução da variação de frequência no sistema ao longo do tempo	60
4.2	Evolução da absorção máxima de potência reativa nos vários geradores ao longo do tempo	60
4.3	Evolução da produção de potência ativa nos vários geradores ao longo do tempo	63
4.4	Evolução da tensão máxima da rede ao longo do tempo	63
4.5	Evolução da variação de frequência no sistema no sistema ao longo do tempo	65
4.6	Evolução da produção de potência ativa nos vários geradores ao longo do tempo	65
4.7	Evolução da tensão máxima da rede ao longo do tempo	66
4.8	Evolução da absorção máxima de potência reativa nos vários geradores ao longo do tempo	66
4.9	Evolução da absorção/produção de potência reativa nos vários geradores ao longo do tempo	68
4.10	Evolução da variação de frequência no sistema ao longo do tempo	69
4.11	Evolução da produção de potência ativa nos vários geradores ao longo do tempo	69
4.12	Evolução da tensão máxima da rede ao longo do tempo	70
4.13	Evolução da função <i>fitness</i> ao longo das iterações realizadas	71
4.14	Evolução da variação de frequência no sistema no sistema ao longo do tempo	72

4.15	Evolução da produção de potência ativa nos vários geradores ao longo do tempo .	72
4.16	Evolução da tensão máxima da rede ao longo do tempo	73
4.17	Evolução da absorção/produção de potência reativa nos vários geradores ao longo do tempo	74
A.1	Exemplo de execução do comando " <i>add to path</i> "	81
A.2	Exemplo de ações que devem ser realizadas pelo utilizador para garantir o funcionamento da aplicação elaborada	82
A.3	Menu principal da aplicação	82
A.4	Janela em que os dados da rede são introduzidos	83
A.5	Menu relativo ao caso A	84
A.6	Menu relativo ao caso B	85
A.7	Número que codifica a energização de um transformador com as suas diferentes parcelas de codificação coloridas	86
A.8	Número que codifica um incremento de potência com as suas diferentes parcelas de codificação coloridas	87
B.1	Diagrama unifilar da rede utilizada para o desenvolvimento da aplicação	89

Lista de Tabelas

3.1	Exemplo de mutação num plano de RS	38
3.2	Exemplo de codificação da introdução de transformadores na rede através de um número	40
3.3	Exemplo de codificação da energização de linhas de transmissão através de um número	41
3.4	Exemplo de codificação da ligação de geradores através de um número	41
3.5	Exemplo de codificação do incremento de cargas através de um número	42
3.6	Exemplo de codificação de um incremento de carga e da resposta dada pelos geradores através de uma sequência de números	43
4.1	Plano de RS para o reestabelecimento do serviço do esqueleto da rede criado através do caso A	59
4.2	Plano de RS para o reestabelecimento do serviço do esqueleto da rede criado através do caso A	62
4.3	Plano de RS para a reposição de cargas da rede criado através do caso A	64
4.4	Plano de RS para o reestabelecimento do serviço do esqueleto da rede criado através do caso B	68
4.5	Plano de RS para a reposição das cargas da rede criado através do caso B	71
B.1	Características das linhas de transmissão	90
B.2	Características dos geradores	90
B.3	Parâmetros dos transformadores	91

Abreviaturas e Símbolos

AC	Alternate Current
DC	Direct Current
SEE	Sistema Elétrico de Energia
PD	Produção Distribuída
RS	Reposição de Serviço
MAT	Muito Alta Tensão
CE	Computação Evolucionária
EE	Estratégias da Evolução
PE	Programação Evolucionária
AG	Algoritmos Genéticos
PSO	Particle Swarm Optimization
EPSO	Evolutionary Particle Swarm Optimization
SA	Simulated Annealing

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Os Sistemas Elétricos de Energia (SEE) registaram uma evolução notável ao longo dos anos. Esta evolução traduziu-se numa rede maior, mais complexa e com mais constituintes. A preocupação ambiental, provocada pelo consumo em excesso de combustíveis fósseis, assim como pela poluição originada, foi ainda um fator de influência na enorme transformação dos SEE. Uma maior preocupação com a eficiência energética, não só por parte dos consumidores, mas também pelas entidades responsáveis pela produção e transporte de energia, levou a uma transformação significativa nas redes elétricas. Estas tiveram então de se adaptar e incorporar novas tecnologias como a microprodução, produção eólica e hídrica e outras tecnologias de produção dispersa.

A dependência dos utilizadores dos SEE também tem vindo a aumentar ao longo dos anos, sendo que a qualidade de serviço fornecida pelas entidades responsáveis é, hoje em dia, um parâmetro fundamental em qualquer SEE. Devido a isso, a qualidade do serviço tem evoluído continuamente ao longo dos anos, sendo as falhas que provocam interrupção do fornecimento aos consumidores cada vez mais improváveis. No entanto, embora a probabilidade de ocorrência seja baixa, estes fenómenos ainda acontecem, acarretando consequências desastrosas para os utilizadores. Assim sendo, é fundamental que, caso um destes eventos aconteça, o SEE retorne às suas condições normais de operação, no menor tempo possível, sendo que, isto deve ser feito sem desrespeitar qualquer limite técnico inerente ao sistema, respeitando todas as condições de segurança necessárias. Para que isto possa suceder, o operador da rede deve possuir a informação necessária para poder efetuar o restabelecimento de serviço na rede da melhor forma possível. Esta tarefa, é bastante complexa, é uma das principais preocupações das empresas do ramo, sendo mesmo um fator da qualidade de serviço que estas devem garantir.

O operador da rede deve, então, possuir conhecimento sobre todos os componentes da rede e deve possuir planos de reposição de serviço (RS), caso ocorra uma falha que provoque uma descontinuidade no mesmo. Estes planos podem ser gerados simulando situações de restauro de rede após a ocorrência de uma falha, observando as consequências que cada ação provoca no SEE. Devido ao tamanho e complexidade das redes atuais, caso esse trabalho seja feito manualmente,

ou seja, analisando cada ação, uma a uma, o restauro será bastante moroso e os planos gerados podem estar longe dos ideais. Deste modo, a existência de aplicações que consigam gerar estes planos automaticamente é imprescindível, garantindo assim a existência de planos de reposição de serviço mais próximos do ideal ou mesmo ideais, utilizando menos recursos das empresas de energia.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho foi elaborar uma ferramenta que fosse capaz de gerar planos de reposição de serviço viáveis para qualquer rede elétrica. Este processo é uma tarefa complexa, pelo que, o conhecimento do comportamento de todos os fenômenos característicos do processo é muito importante, devendo ser cuidadosamente estudados. As limitações técnicas e regulamentares da rede devem ser cumpridas com o máximo rigor, sendo que os planos gerados, têm que obrigatoriamente ser viáveis e devem demorar o menor tempo possível. Destaca-se, assim, a necessidade de um estudo dos principais aspectos inerentes ao processo de reposição de serviço.

Para desenvolver esta ferramenta foi necessário utilizar um *software* capaz de realizar simulações de trânsito de potências, fazendo, assim, uma análise do comportamento da rede ao longo do tempo, registrando todas as variáveis do SEE ao longo do processo de reposição de serviço, para que fosse possível cumprir os limites técnicos e regulamentares da rede e procurar otimizar a criação de planos de reposição de serviço. O *software* necessitaria também de capacidade para construir algoritmos sob a forma de código, a fim de ser possível automatizar todos o processo de identificação de soluções de reposição de serviço (RS). A última característica necessária ao *software* seria um meio de comunicação entre os resultados das simulações de trânsito de potências gerados e os algoritmos desenvolvidos. Com estas características cumpridas, foi possível identificar de forma automática estratégias de reposição de serviço para redes, embora de forma simples, ou seja, não considerando algumas variáveis, estabelecendo o processo de elaboração de planos de reposição de serviço. A partir das estratégias criadas pela aplicação, basta que o operador as siga, de forma a realizar o reestabelecimento do serviço na rede em questão.

Foram desenvolvidas duas ferramentas diferentes capazes de elaborar planos de RS. Na primeira (caso A), o processo utilizou um método de decisão empírico na elaboração dos planos. A segunda ferramenta (caso B), utilizou igualmente um método de decisão empírico, semelhante ao utilizado no caso A, para a construção do esqueleto da rede, sendo que este é constituído por geradores, transformadores e geradores elétricos. Na fase de restauro de cargas, foi utilizada uma meta-heurística para tomar as decisões necessárias à elaboração desta parte dos planos de RS.

1.3 Estrutura da dissertação

Este documento, que expõe o trabalho desenvolvido, foi organizado em cinco capítulos, sendo o conteúdo de cada um exposto de seguida:

- Capítulo 2 – São introduzidos alguns conceitos sobre os temas estudados, sendo que o conhecimento deste é necessário para que seja possível compreender o trabalho desenvolvido.
- Capítulo 3 – O *software* utilizado para a conceção da aplicação é apresentado, tal como os dois diferentes casos desenvolvidos. O funcionamento dos algoritmos responsáveis por gerar os planos de reposição de serviço em cada caso é explicado.
- Capítulo 4 – Um exemplo de um plano de reposição de serviço gerado pelo caso A e outro gerado pelo caso B são analisados detalhadamente, sendo realizada uma crítica à variação ao longo do tempo das variáveis relevantes ao processo de restauro. Por fim, é feita uma comparação entre os dois planos gerados por ambos os casos.
- Capítulo 5 – As conclusões do trabalho desenvolvido são apresentadas, tal como as perspetivas futuras do mesmo, sendo explicado os potenciais melhoramentos que podem ser efetuados nas aplicações criadas.

Capítulo 2

Estado da arte

2.1 Sistema elétrico de energia

2.1.1 Introdução

O início do uso comercial da eletricidade só ocorreu em meados de 1870. Durante esse período, as lâmpadas de arco eram a norma. Estas eram utilizadas na iluminação pública e em faróis. Em 1882, em Nova Iorque, Thomas Edison concebeu o primeiro sistema elétrico de energia. A histórica central de Pearl Street Station era constituída por um gerador, cabo, fusível, contador e cargas. Este sistema era DC e alimentava 59 consumidores distribuídos por um raio de 1,5 km, através de um gerador elétrico movido a vapor. Thomas Edison foi então um os grandes pioneiros de uma indústria que viria a tomar enormes proporções, pois traçou o caminho a novos sistemas semelhantes que viriam a ser implementados em várias cidades por todo o mundo. Em Portugal, a primeira empresa de eletricidade, a Companhia Portuguesa de Eletricidade, foi fundada em 1880. Os primeiros passos da indústria, e da eletricidade em terras lusitanas foram a instalação de luz elétrica em fábricas de têxteis, como a Real Fábrica de Fiação em Tomar. Desde o arranque da *Pearl Street Station* que os SEE têm vindo a sofrer sucessivas expansões e melhorias tecnológicas sendo que estas desencadearam uma evolução significativa, sendo possível verificar: [3][4][5]

- Maior necessidade de geração, aumentando assim o número de centrais de produção;
- Rede mais extensa e interligada;
- Crescente dependência energética por parte da sociedade, forçando assim maiores níveis de segurança e fiabilidade;
- Introdução de novas tecnologias e equipamentos no sistema, que obrigam a um diferente tipo de gestão da rede.

Esta evolução dos SEE conduziu a um sistema mais complexo do ponto de vista de operação e controlo, operando cada vez mais próximo dos seus limites técnicos, e sendo menos tolerante

a interrupções. É por isso necessária uma constante preocupação em aprimorar os métodos de monitorização e controlo de operação do SEE.

Hoje em dia, os sistemas elétricos de energia apresentam-se organizados numa hierarquia bem definida. Eles variam nos seus componentes e em tamanho, no entanto, apresentam características comuns. Estas são: [3]

- Sistema trifásico em corrente alternada que opera com tensões essencialmente constantes. As cargas industriais são invariavelmente trifásicas. As cargas residenciais e comerciais são distribuídas de forma equilibrada pelas fases, de forma a funcionarem como um sistema trifásico equilibrado;
- Utilização essencialmente de máquinas síncronas para a produção de energia;
- Transmissão de potência a consumidores a grandes distâncias, distribuídos por uma grande área. Para que isto seja possível, possuem vários níveis de transmissão de energia, com diferentes tensões nominais.

O conceito de um SEE pode ser definido através de uma estrutura ordenada da produção para o consumo. A produção, por norma, é realizada em geradores de grande capacidade. De seguida, a energia produzida por estes é transportada ao longo de grandes distâncias por um sistema de transmissão estruturado em diversos níveis até que é entregue ao consumidor final.

Devido ao grande contributo para uma melhor qualidade de vida que este tipo de sistemas proporciona e ao aumento populacional, o seu crescimento, desde a sua descoberta, até aos tempos de hoje tem sido gigantesco. A potência instalada, números de consumidores e a área energizada têm vindo a sofrer intensos aumentos. A energia elétrica tornou-se assim um bem essencial para a economia de qualquer país, sendo que os principais impactos provocados por um colapso do SEE podem ser divididos em três grupos: [6]

- Produção:
 - Perdas na produtividade;
 - Danos em produtos ou propriedades.
- Saúde:
 - Contaminação de produtos alimentares;
 - Disrupção de serviços médicos;
 - Ansiedade.
- Segurança:
 - Acidentes de viação;
 - Acidentes provocados devido à fraca visibilidade;
 - Agitação da população.

Tradicionalmente, o SEE, seguiu um desenvolvimento baseado numa estrutura hierarquizada. No entanto, com a evolução da tecnologia, surgiram avanços significativos que ameaçam mudar a sua estrutura. Nomeadamente, o grande aumento de unidades de pequena geração capazes de captar os recursos energéticos distribuídos pelos vários locais da rede. Este aumento deveu-se não só a uma maior necessidade de potência instalada e de independência energética mas também devido a políticas públicas que motivaram o cumprimento de metas relacionados com a diminuição das emissões de gases de efeito de estufa.

Desta forma, nasce o conceito de Produção Dispersa. Esta trata-se de uma produção elétrica de pequena dimensão, entre os kW e os MW, capaz de alimentar diretamente os consumidores no local da instalação e de injetar potência na rede. Destina-se a captar um recurso distribuído ou descentralizado, como por exemplo, o vento, sol, água etc.. Caracteriza-se por produzir junto das cargas, o que se traduz numa redução dos custos de transporte de energia e pode funcionar ligada ou desligada da rede elétrica. [7]

A integração da Produção Dispersa (PD) na rede dificulta o cumprimento das normas de segurança e a análise da rede, pois, devido a preocupações económicas procurar-se fazer uma exploração cada vez mais eficiente da rede. Isto traduz-se num sistema cada vez mais próximo dos seus limites técnicos de operação. O progressivo aumento da implementação de sistema de produção distribuída gera diversos impactos à rede, sendo que os mais significativos são seguintes:

- Alteração do trânsito de potências na rede;
- Alteração da qualidade de serviço;
- Maior complexidade de coordenação das proteções da rede;
- Maior dificuldade no pré- despacho e despacho das unidades convencionais;
- Variações das tensões no sistema, relativamente ao seu valor nominal.

2.1.2 Estabilidade do sistema elétrico de energia

As condições de operação do SEE podem ser classificadas em três diferentes estados: preventivo, emergência e restabelecimento. Esta foi a primeira definição dos estados de um sistema elétrico e foi publicada por Tomas Dy Liacco[8] sendo que esta pode ser consultada na figura 2.1.

No estado de operação preventivo, ou normal, o sistema garante que a carga seja sempre satisfeita e que os níveis de frequência e tensão estejam próximos dos nominais. Este estado é aquele em que o sistema se encontra em cerca de 99% do tempo de operação. Neste, todos os seus elementos se encontram dentro dos seus limites técnicos e o sistema é capaz de permanecer estável, mesmo após uma perturbação. Este estado tem por objetivo garantir que a carga é satisfeita, sem interrupções e a um custo mínimo. [5]

O sistema encontra-se no estado de operação de emergência quando o sistema não é capaz de manter os seus níveis de segurança de frequência ou de tensão, quando perde o sincronismo ou quando a algum equipamento é solicitado o seu funcionamento próximo dos seus limites técnicos.

Este estado tem por objetivo prevenir a degradação do sistema, satisfazendo o máximo de carga possível, sendo que as preocupações económicas não são prioritárias. [5]

O estado de operação de reestabelecimento ocorrer, por norma, após o estado de emergência e verifica-se quando existe deslastre de cargas. Este tem por objetivo restaurar as cargas que foram deslastradas, satisfazendo assim a totalidade da carga em segurança, no menor tempo possível. [5]

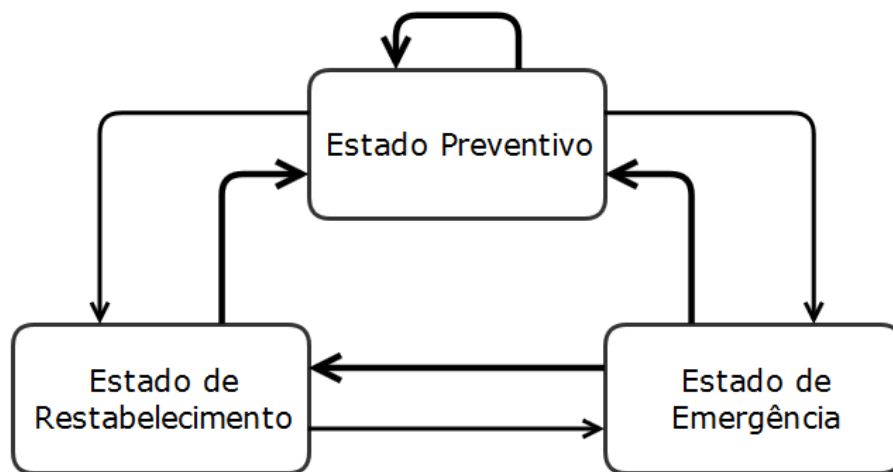


Figura 2.1: Estados de operação de um SEE [8]

A estabilidade pode definir-se como a propriedade mediante a qual um determinado sistema se mantém em equilíbrio em condições normais de operação e é capaz de retomar um estado de equilíbrio após sofrer determinada perturbação. Deste modo, ao explorar um SEE, há a necessidade em garantir a capacidade do sistema alimentar as cargas de um modo contínuo e com as características de tensão e frequência próximas dos valores nominais. Caso contrário, os equipamentos dos consumidores poderão não funcionar da uma maneira satisfatória. [6][9][10][1]

Um SEE é um sistema dinâmico, estando a qualquer momento a surgir alterações no mesmo. Estas podem ser avarias, saídas de funcionamento de linhas, variações nos perfis de consumo. Isto provoca desvios nos valores nominais de tensão e frequência e desta forma, leva a que o sistema nunca esteja numa condição estável, levando assim os geradores a sofrer constantes ajustes na potência produzida, para corrigir os efeitos dos acontecimentos descritos na rede. [6]

O estudo da estabilidade de um SEE divide-se em três grandes classes, tal como é possível observar na figura 2.2. Esta classificação de estabilidade proposta é baseada nas seguintes considerações: [1]

- A natureza física do modo de instabilidade indicada pelas principais variáveis do sistema nas quais a instabilidade pode ser observada;
- A dimensão da perturbação, que influencia o método de cálculo e previsão da estabilidade;
- Os processos, componentes e a duração que devem ser considerados para verificar a instabilidade.

A classificação de um SEE pode ser feita através de três aspetos, a estabilidade relativamente à capacidade de as máquinas síncronas manterem o sincronismo com a rede e a estabilidade relacionada com a frequência e tensão do sistema. Esta classificação pode ser observada na 2.2.

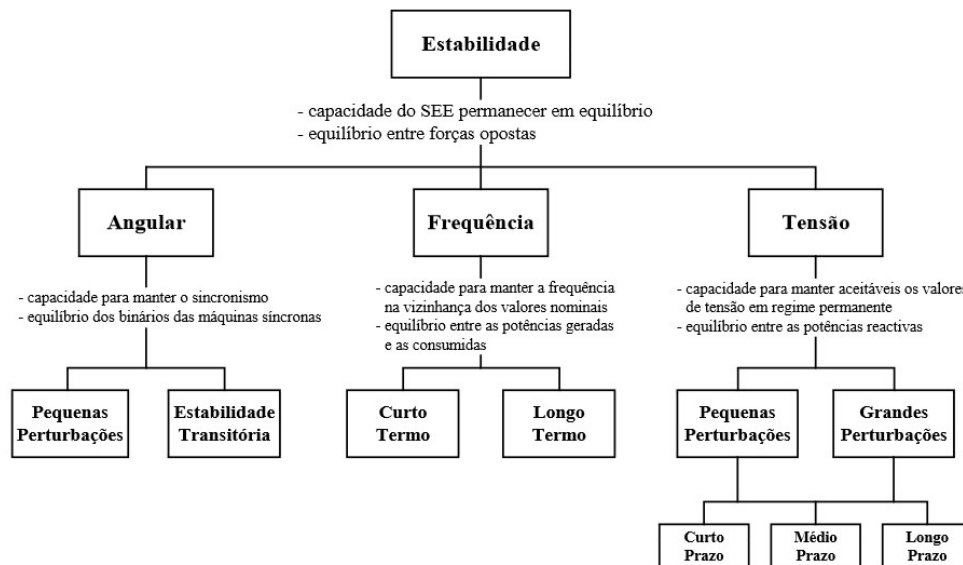


Figura 2.2: Classificação dos diferentes tipos de estabilidade no SEE [1]

2.1.2.1 Estabilidade das máquinas síncronas

A estabilidade de uma máquina síncrona depende da sua capacidade de permanecer em sincronismo depois de ter sido sujeita a uma perturbação. Esta depende da capacidade em manter o equilíbrio entre a sua potência elétrica e mecânica. Caso este equilíbrio não aconteça, irá surgir uma aceleração ou desaceleração do rotor da máquina que poderá provocar a perda do sincronismo com a rede. Se um gerador funcionar com uma velocidade superior a outro que opera no mesmo sistema, ainda que temporariamente, a posição angular dessa máquina sofrerá um aumento em relação à máquina com menor velocidade de funcionamento. Esta diferença angular provocada pelo desequilíbrio nas velocidades irá provocar uma transferência de carga da máquina que opera a menor velocidade para a outra. Devido ao aumento de carga, a máquina que operava a maior velocidade tende a estabilizar. Desta forma, a posição do rotor e a sua velocidade estabilizam. Caso o sistema não consiga absorver a energia cinética correspondente às diferenças de velocidade do rotor o sistema fica instável. [10]

As perturbações na estabilidade das máquinas síncronas podem ser divididos em duas categorias, pequenas perturbações (estabilidade estacionária) e estabilidade transitória. Ambas se relacionam com a capacidade do sistema manter o sincronismo após perturbações pequenas na rede ou perturbações graves como curto circuitos ou saídas de serviço de linhas. [10]

2.1.2.2 Estabilidade da tensão

A instabilidade da tensão ocorre na forma de uma progressiva queda de tensão em alguns barramentos. Uma das possíveis consequências desta instabilidade é a perda de cargas numa área, ou a saída de serviço de linhas de transmissão e de outros elementos de proteção, levando a falhas progressivas no sistema. A instabilidade na tensão pode dar origem a uma sequência de eventos que provoca um colapso na tensão. Esta, por sua vez, pode desencadear um *blackout* ou tensões invulgarmente baixas numa parte significativa do SEE. A principal causa de instabilidade causada na tensão são as variações de carga na rede. Nesta situação, existe uma tentativa de restaurar o consumo de energia por parte das cargas, mas a capacidade da rede de transmissão e da produção não é suficiente para responder a este pedido, gerando assim uma instabilidade na tensão. Estas perturbações podem ser divididas em duas categorias, de acordo com a gravidade originada: [10]

- Pequenas perturbações, como por exemplo pequenas mudanças nos perfis de carga;
- Grandes perturbações, como curto- circuitos e saída de serviço de linhas de transmissão.

2.1.2.3 Estabilidade da frequência

A estabilidade da frequência refere-se à capacidade que um SEE possui de manter a sua frequência em níveis perto dos nominais depois de ocorrer um defeito que gera um desequilíbrio significativo entre produção e carga. Esta capacidade resulta de ser exigido ao sistema a manutenção ou restauro do equilíbrio entre produção e carga como o mínimo de perdas de carga possível.

Por norma, os problemas de estabilidade da frequência correspondem a uma insuficiência na produção que alimenta a carga do sistema ou a uma má coordenação dos sistemas de proteção da rede. Em sistemas isolados, a instabilidade na frequência pode ser causada por qualquer perturbação, traduzindo-se numa perda significativa de carga ou produção. A instabilidade da frequência pode apresentar-se como uma ocorrência de longa ou curta duração. [10]

2.2 Reposição do serviço

2.2.1 Introdução

Os SEE de hoje em dia disponibilizam energia elétrica com elevados níveis de fiabilidade. No entanto, devido a má combinação de circunstâncias pouco previsíveis, existe a possibilidade de um colapso parcial ou total do sistema. Assim sendo, é importante estar preparado para um evento desta magnitude, caso ele aconteça. Para essa preparação é imprescindível a existência de planos de reposição do serviço, que sejam de fácil compreensão, atuais e acessíveis para permitir uma recuperação rápida e ordenada, de forma a minimizar o impacto nos consumidores. [11]

Desde meados de 1960, a indústria dos sistemas elétricos providenciou e desenvolveu esforços consideráveis para implementar medidas preventivas a fim de reduzir a possibilidade e a propagação de um colapso do sistema. No entanto, era feito pouco esforço para realizar um planeamento

de reposição de serviço do sistema com o objetivo de minimizar o tempo em que este estaria fora de serviço depois da ocorrência de um colapso. Somente em finais de 1970 é que esta indústria começa a aperceber-se da importância deste problema e começa a abordá-lo seriamente. Desde então, o volume de publicações aumentou significativamente e o tema começou a ser estudado em detalhe. Em 1981, Kafka e Adibi [12] apresentaram um trabalho que propunha o desenvolvimento de planos de reposição do serviço do sistema com o objetivo em minimizar o tempo em que este é feito para um sistema elétrico urbano. [13]

A contínua expansão dos SEE, a sua operação cada vez mais perto dos limites técnicos, o rápido incremento do número de unidades de geração, o crescimento da integração de geração com uma menor previsibilidade da carga, resulta num SEE mais complexo e que se traduz em mais problemas para o operador de rede. Devido a isto, a garantia da continuidade de serviço e a manutenção da estabilidade do SEE tem vindo a tornar-se numa questão cada vez mais complicada. Por isso, o estudo da reposição de serviço é essencial para que os planos efetuados para a RS sejam atuais.

A degradação das condições de um SEE pode suceder a uma velocidade tal que as proteções não tenham tempo de reagir. Esta situação provoca perdas críticas no fornecimento de energia ao cliente (*blackout*). Embora a ocorrência de *blackouts* não seja muito frequente, estes infelizmente acontecem. Alguns exemplos recentes destes episódios são apresentados de seguida: [14]

- O *blackout* de 19 de Dezembro de 1978 que o SEE Francês experienciou. O evento foi provocado por uma falha, provocada por uma sobretensão, numa linha de transmissão de 400 kV. A sobretensão espalhou-se pelo resto da rede causando um *blackout* de cerca de 75% da rede (cerca de 29000 MW de carga). Após três horas, cerca de 55% da carga estava reposta, o processo de restauro completo durou cerca de 10 horas;
- Em 27 de Dezembro de 1983, deu-se um *blackout* no SEE Sueco. A causa deste acontecimento foi uma falha numa subestação perto de Estocolmo, esta levou a que diversas linhas de transmissão saíssem de serviço. Devido a isso os centros de carga do sul ficaram sem acesso à energia proveniente de produção hídrica e importação. Cerca de 67% da carga do SEE ficou sem fornecimento e somente passadas 7 horas é que o sistema foi totalmente restaurado;
- O *blackout* total do sistema helénico ocorreu em março de 1989. Tal como sucedeu no caso Sueco, este foi provocado por uma falha numa subestação, que por sua vez provocou a saída de serviço de várias linhas de transmissão do SEE. Somente após de três horas, é que o sistema foi totalmente restaurado.

A realização desta tarefa de RS após um colapso de uma rede elétrica é deveras complexa, pois é bastante exigente com o desempenho dos operadores de rede e com o tempo total necessário para completar o processo. Estes operadores são treinados através da utilização de simuladores de SEE, pelo que, por norma estão preparados para lidar com situações como *blackouts* do sistema. Em adição a este treino recebido pelos operadores, também existem planos de RS com diretrizes a

seguir durante todo o processo. No entanto, estes planos focam-se geralmente na primeira fase do processo de RS, pelo que esta primeira fase é a de maior vulnerabilidade do sistema. A segunda fase do processo de RS, que tem por objetivo restaurar o fornecimento de carga aos clientes quando o SEE se encontra num estado mais robusto, tem sido alvo de pouca a atenção na literatura. [14]

Desta forma, a realização de um plano de RS completo, que seja de uma execução, fácil, segura e rápida torna-se fundamental para que os SEE estejam mais preparados para lidar com este tipo de situações que podem levar a acontecimentos catastróficos.

2.2.2 Considerações

As perturbações mais graves que afetam o SEE são por norma causadas por defeitos transitórios e têm origem nos sistemas de transmissão. Uma grande parte destas perturbações origina-se através de fenómenos atmosféricos, como descargas elétricas. No entanto, estas ocorrências levam, geralmente, a que a parte da rede afetada seja imediatamente isolada pelo sistema de proteção, deixando assim o sistema sem qualquer defeito. Contudo, em alguns casos estes defeitos transitórios podem gerar perdas na produção, na carga e nas ligações da rede. Estes efeitos subsequentes podem provocar o colapso total de um SEE. [11]

Como os SEE variam bastante na sua tipologia é natural que os planos de RS para cada uma também apresentem um certo grau de variedade. No entanto existem características em comum entres os diversos planos, sendo aqui apresentados alguns dos aspetos mais cruciais: [11]

- Energização imediata dos serviços auxiliares das unidades de geração;
- Tempo necessário a manobras de operação;
- Tempo de arranque das unidas térmicas de geração, pois estas possuem um tempo de arranque significativamente grande;
- Aumento do nível de tensão da rede, em resultado do fecho das linhas com pouca carga ligada;
- Capacidade de realizar uma resposta em frequência a um súbito aumento de carga.

Desta forma, conclui-se que é possível estabelecer um procedimento geral para efetuar uma rápida RS. Todavia, deve ser concebido um plano detalhado que vá ao encontro dos requisitos particulares de cada SEE. Por isso, determinar e registar as características relevantes de cada SEE é crucial. Contudo, existem três condições fundamentais que devem ser garantidas em qualquer etapa do processo de RS: [11]

- Controlo de tensão dentro dos limites estabelecidos;
- Equilíbrio de geração entre potência ativa e consumo;
- Coordenação eficiente dos sistemas de proteção.

2.2.2.1 Equilíbrio de potência reativa

O equilíbrio entre potência reativa e consumo é garantido caso a energia reativa gerada pelos vários componentes do sistema seja igual ao consumo no mesmo. Para que ele seja possível, é necessário conhecer a disponibilidade e limitações de todos os componentes que influenciam o trânsito de potência reativa na rede. Para gerir as sobretensões que ocorrem na rede decorrentes de um processo de RS é fundamental conhecer algumas características. Estas características têm que ver com aspetos técnicos como correntes de ligação (capacitivas) de cabos subterrâneos, existência e controlo de baterias de condensadores ou de indutâncias e limites de excitação das máquinas síncronas. [13]

O primeiro passo do processo de RS envolve a energização de uma linha de transmissão, que resulta num incremento nos níveis de potência reativa por todo o sistema. Isto acontece pois as linhas de transmissão em vazio geram uma quantidade significativa de energia reativa capacitiva. A resolução mais adotada para este problema passa por ligar uma carga reativa no final dessa linha ou a aplicação de equipamentos de controlo e compensação, como o STATCOM, nos sistemas que têm a possibilidade de utilizar estes recursos. No entanto, em alguns casos, dependendo do estado do processo de RS, a energização de linhas pode ser realizada sem que ocorram problemas no controlo da energia reativa. Isto deve-se ao facto de os geradores da rede possuírem uma capacidade de absorção de energia reativa capacitiva de acordo com a sua potência nominal e reativa gerada no momento. [6][15]

A ligação de linhas de transmissão com pouca carga pode gerar violações nos limites das capacidades da geração reativa e ocorrência de sobretensões. Estas são originadas devido às grandes correntes provocadas pela energização da linha. Para que se possa evitar este tipo de problemas, deve ser feito um balanço correto da potência reativa, sendo fundamental que os geradores tenham a capacidade de dar respostas a estas variações rápidas, utilizando as malhas de controlo dos reguladores de tensão do gerador.

2.2.2.2 Equilíbrio de potência ativa

O equilíbrio da potência ativa é um aspeto fundamental no processo de RS. A existência deste significa que as fontes de produção têm capacidade de alimentar todas as cargas. Para se conseguir este equilíbrio imperam questões técnicas, tais como a capacidade de arranque autónomo, o tempo de arranque das unidades, os tempos de resposta a solicitação de carga, os limites de carga dos grupos, quando, em modo de emergência são essenciais para o sucesso do processo de RS. [13]

A conceção de um plano de RS requer um conhecimento aprofundado do comportamento do SEE, durante períodos de colapso, restauro e reintegração. Consequentemente, é necessário que a informação acerca destes mesmos tópicos seja o mais próximo da realidade possível. Infelizmente, o comportamento do sistema durante esses períodos é incerto, dificultando assim o processo de RS. Isto acontece dado que a configuração exata do sistema e o estado operacional dos componentes não é conhecido com precisão. Existe também outra componente que dificulta o processo de RS, ao aumentar o grau de imprevisibilidade do processo. Nesta componente, o perfil de consumo

varia seguido de um colapso de acordo com fatores como condições atmosféricas, hora do dia, características dinâmicas e específicas das cargas envolvidas e duração do colapso. [11]

Através da frequência da rede e da velocidade dos alternadores, é possível verificar se existe equilíbrio entre a potência produzida e a consumida. Caso a potência produzida seja superior à consumida, a velocidade dos alternadores aumenta, tal como a frequência. Se existir um défice de potência produzida em relação à consumida, surgirá uma diminuição da velocidade dos alternadores e, consequentemente, uma redução do valor da frequência da rede. Deste modo, é possível realizar um controlo automático da rede através dos desvios de frequência. [1]

O processo de RS requer que exista um equilíbrio entre produção e carga, de modo a evitar desvios de frequência. A frequência é um indicador da qualidade da energia fornecida e deve estar sempre dentro dos seus valores nominais. Caso contrário, se for violado algum limite técnico de um equipamento ou por atuação de proteções, a rede pode ser parcialmente desligada ou, na pior das hipóteses, pode surgir um novo colapso do sistema. [6]

2.2.2.3 Características dos sistemas de proteção

Deve ser realizado um estudo cuidadoso sobre as características dos sistemas de proteção presentes na rede, pois estes são regulados para um modo de funcionamento normal do SEE e para que, durante o processo de RS, as proteções não atuem involuntariamente, comportando assim incómodos para o processo. Deste modo, é fundamental que o esquema de proteções possua uma configuração apropriada para que o processo de RS possa ser realizado corretamente. Assim, este esquema deve possuir as seguintes características: [6][13]

- **Dependência** – Fiabilidade na atuação correta da proteção;
- **Segurança** – Continuidade de operação do sistema mesmo após a ocorrência de fenómenos anormais;
- **Velocidade** – Cumprimento do tempo mínimo predefinido para eliminação de defeitos;
- **Seletividade** – Garantir que para isolar o defeito, é retirado de serviço o mínimo equipamento necessário.

2.2.3 Problemas frequentes

O processo de RS é muitas vezes realizado em condições anormais, sendo que diferentes processos de RS apresentam diferentes obstáculos. Por isso a análise cuidada dos mesmos é fundamental, para que a resposta dada a problemas futuros possa ser a melhor possível.

No artigo publicado em 1991, M.M. Adibi e R.J. Kafka analisam os problemas inerentes à RS durante as três fases do processo, sendo estas: [16]

- Planeamento do restauro do SEE;
- Ações realizadas durante a degradação do sistema com o objetivo de conservar fontes de produção importantes;

- Restauro no momento em que o SEE estabilizou num certo nível de degradação.

Os autores realizaram também uma divisão dos problemas mais frequentes inerentes ao processo de RS, sendo aqui enumerados e resumidamente descritos: [6][16][14]

2.2.3.1 Efeito Ferranti

O efeito de Ferranti é um fenómeno que ocorre durante a energização de uma linha de transmissão em vazio. A tensão sustentada no final da linha é maior do que a do início. Para linhas pequenas, a repercussão provocada por este efeito não é negligenciável. No entanto, para linhas maiores, a diferença de tensão entre as pontas das linhas pode ser bastante grande. Este problema pode ser corrigido ao diminuir a tensão de excitação da fonte, tendo o devido cuidado para não violar os limites de excitação. Esta solução deve produzir tensões aceitáveis no final da linha de transmissão.

O aumento da tensão gera um aumento na produção de energia reativa que deve ser compensado. De forma a reduzir esse aumento, devem poder executar-se algumas medidas corretivas, tais como:

- Absorver carga capacitiva;
- Desligar todas as fontes de carga reativa capacitiva;
- Energizar somente as linhas que estão associadas a cargas importantes.

2.2.3.2 Equilíbrio da potência reativa

O equilíbrio da potência reativa, tal como já foi referido anteriormente é fundamental ao sucesso do processo de RS. Este está profundamente relacionado com as possíveis sobretensões do sistema, e caso este não, seja alcançado pode ocorrer a autoexcitação dos geradores e um aumento exponencial da tensão.

2.2.3.3 Tensões transitórias

As tensões transitórias são originadas através da energização de largas porções de segmentos de um SEE ou pela ligação de elementos capacitivos. Estas possuem uma natureza transitória e por norma, não são fatores limitativos durante o processo de RS.

Um dos objetivos da RS, durante a fase de reintegração, é a energização da maior secção possível de linhas de transmissão de alta tensão que as tensões transitórias permitirem, existindo um compromisso entre o cumprimento dos limites técnicos dos equipamentos e o tempo total que o processo de RS requer. Deste modo, surge a necessidade de uma metodologia simples para energizar linhas de transmissão.

2.2.3.4 Problemas de interconexão

Este problema passa por determinar em que momento do processo de RS é que se pode retirar de serviço as linhas de ligação aos serviços adjacentes. Na prática corrente, as linhas de MAT são ativadas no sistema a ser restaurado, quando existem unidades com uma grande capacidade de absorção de potência reativa em serviço. Logo, é necessário uma norma simples e quantitativa que permita determinar a capacidade de absorção de potência reativa das unidades em serviço.

2.2.3.5 Ferro-Ressonância

A ferro-ressonância é um fenómeno oscilatório de longa duração com um baixo amortecimento. Este fenómeno pode ocorrer num circuito elétrico quando o equivalente da capacidade está em série ou em paralelo com o equivalente não linear do elemento indutivo. No primeiro caso, o fenómeno é denominado de ferro-ressonância, e no segundo caso, denomina-se de ferro-ressonância em paralelo.

Quando um transformador é energizado nos primeiros passos do processo de RS, caso uma linha de transmissão em vazio (carga capacitivas) e um transformador (elemento indutivo não linear) estiverem em série, gera-se um circuito oscilatório que pode desencadear o fenómeno de ferro-ressonância. Este pode ocorrer quando a frequência do circuito for igual à frequência nominal da rede e manifesta-se através de um súbito aumento na corrente no transformador, podendo criar uma sobretensão na entrada ou saída do transformador.

De modo a amortecer as oscilações ferro-ressonantes, quando um transformador sem carga é energizado, podem ser tomadas as seguintes medidas:

- Introduzir carga no transformador ligando carga suficiente na rede;
- Ligar dois ou mais transformadores através da sua resistência de fecho;
- Energizar somente as linhas que possuem carga importante.

2.2.3.6 Equilíbrio entre energia ativa gerada e consumida

Tal como já foi discutido anteriormente, este problema tem que ver essencialmente com a garantia de que os limites de frequência do sistema são cumpridos, tendo em conta que uma variação na carga levará a uma variação na frequência.

2.2.3.7 Resposta em frequência das máquinas síncronas

Os primeiros passos do processo de RS, na prática corrente, dependem da ativação de unidades de geração hidráulicas e térmicas. Estas apresentam uma boa capacidade para controlar a frequência, pois conseguem responder rapidamente a uma variação de frequência do sistema.

2.2.3.8 Capacidades de *black-start*

As primeiras ações tomadas num processo de RS dizem respeito à colocação em serviço das unidades de produção. Para concluir esta etapa, é necessário estar familiarizado com a localização geográfica das unidades e com a sua natureza. Durante esta fase, as unidades que possuem capacidades de *black-start* apresentam um grande interesse para o operador de rede. Estas unidades vão produzir potência necessária ao arranque das unidades térmicas sem capacidade de *black-start*. Por norma, são centrais com turbinas de combustão, centrais hidroelétricas ou centrais nucleares¹. As unidades auxiliares das centrais térmicas e em particular as centrais nucleares, devido a razões de segurança, possuem a primeira prioridade de abastecimento de energia. Em regra, durante esta etapa do processo de RS, algumas cargas têm que ser preenchidas para que exista equilíbrio entre a potência ativa gerada e a consumida.

2.2.3.9 Restabelecimento de cargas

É impossível prever corretamente a carga no sistema com uma certeza absoluta. Existem diversos fatores que influenciam as variações de carga no sistema antes da ocorrência de um *blackout*, tais como:

- Nível de carga anteriores à perturbação;
- Fatores de potência e tipos de consumidores;
- Carga total fornecida;
- Duração da interrupção.

Obter uma previsão que seja o mais próximo da realidade facilita o processo de RS. Pelo que, durante os primeiros passos do processo de RS, é necessário conhecer o volume de potência ativa e reativa que poderá ser alimentada, mantendo durante todas as etapas o equilíbrio relativo à potência ativa e à reativa.

Ao energizar a rede, para que seja possível ligar unidades de produção sem capacidade de *black-start*, algumas cargas devem ser ligadas por motivos de segurança. Estas cargas devem corresponder aos mínimos técnicos de produção das unidades térmicas conectadas no sistema. Cada carga reestabelecida provoca um pequeno decréscimo na frequência do sistema. Quando a inércia do sistema for pequena, melhor dizendo, caso o número de unidades presentes no sistema seja reduzido, essa carga deve ser reestabelecida através de pequenos incrementos.

2.2.3.10 Sequência ótima de arranque das unidades de geração

Durante o processo de RS, é necessário que os operadores saibam de antemão as quantidades de geração ativa e reativa que estarão disponíveis num determinado momento. Esta informação

¹Na estratégia de RS da EDF (Électricité de France) o uso de centrais nucleares como unidades de *black-start* é frequente. Isto deve-se ao facto de que a produção de energia em todo o país é predominantemente nuclear. No entanto, nos USA, a Comissão Reguladora do Nuclear proíbe o uso de centrais desta natureza como unidades de *black-start*.

pode ser utilizada na otimização da sequência de diversas operações inerentes à RS. Isto permite uma redução significativa do tempo total do processo.

2.2.3.11 Localização do defeito

A maior parte das perturbações no SEE são geralmente provocadas por defeitos transitórios e por erros do operador, originados nos sistemas de transmissão, resultando em colapsos numa área considerável. Grande parte das interrupções de serviço nos SEE são provocadas por defeitos temporários cuja solução é quase imediata, deixando o sistema sem perturbações. Por esta razão, a identificação de defeitos não é considerada uma prioridade alta no processo de RS. No entanto, a tentativa de restabelecer uma linha ou equipamento defeituoso poderá provocar uma maior perturbação e consequentemente um incremento no tempo total necessário ao processo de RS. Este tempo é ainda afetado pelo conhecimento das linhas de transmissão que se encontram em serviço, pois as funções do operador são assim facilitadas. Por conseguinte o conhecimento da localização do defeito é fundamental para o processo de RS.

2.2.3.12 Avaliação do estado das comutações

A ocorrência de colapsos parciais do sistema e a dependência dos sistemas de interconexão necessitam de uma avaliação do sistema e do seu estado de comutações. Este processo utiliza tempo que é crítico à RS e tem vindo a ser responsável pelo atraso do processo de RS em vários SEE. Uma das opções que permite reduzir o tempo consumido por esta avaliação é a abertura de todos os disjuntores após perda de tensão. Esta abertura permite simplificar e acelerar o processo. Outra opção utilizada é a minimização da abertura dos disjuntores através de uma seleção criteriosa, sendo que esta é mais complexa, dado que utiliza sistemas computacionais para a monitorização das comutações.

2.2.3.13 Ângulos de carga dos geradores

A estabilidade do SEE, na abordagem de RS por ilhas elétricas, depende da igualdade dos vários ângulos de carga dos diversos geradores antes da interconexão dos sistemas. O fecho de uma linha de ligação quando o sistema apresenta ângulos e carga diferentes pode gerar um choque no sistema e consequentemente instabilidade. O ângulo pode ser reduzido alterando os planos de geração em ambos os lados do disjuntor.

2.2.3.14 Esquemas de isolamento em baixa frequência

Este tipo de esquemas é utilizado para isolar alguns geradores de uma central. É composto por geradores com cargas locais semelhantes às do gerador que pretende isolar. Este esquema permite a formação de um subsistema que opera a uma frequência mais baixa do que a nominal. Deste modo, é possível que as unidades de geração não tenham de recomeçar de uma situação de saída de serviço total, reduzindo assim o tempo de arranque destas unidades em várias horas. No entanto,

ao utilizar esta metodologia surgem alguns problemas, pois a quantidade de potência gerada e carga local tem que ser equilibrada, caso contrário, o subsistema colapsa. Devido a isso, torna-se necessário realizar uma previsão da evolução da carga e garantir que a diferença de potência não seja superior ao limite operacional.

2.2.3.15 Criação de ilhas elétricas intencionais

A criação intencional de ilhas elétricas é feita de forma que a sequência do processo de RS possa ser otimizada. Esta divisão é realizada devido às flutuações de tensão existentes em diferentes setores do SEE. Ao energizar em separado estes locais, em primeiro lugar, é possível reduzir o tempo de interrupção de serviço, tornando o processo de RS mais eficiente. Quando as grandezas dos sistemas das diferentes ilhas estiverem em sintonia, tal como os ângulos de cargas dos geradores e a tensão, pode proceder-se à sua interconexão.

2.2.3.16 Deslastre local de cargas

A necessidade de deslastre local de cargas provém, por norma, de causas imprevisíveis, defeitos na geração ou falhas no sistema de distribuição e transmissão. Este processo permite a colocar num ponto de funcionamento estável equipamentos que possuam demasiada carga, evitando assim a saída de serviço dos mesmos e o possível colapso do sistema. Este processo é realizado quando a geração não consegue alimentar todas as cargas no sistema, com o objetivo de salvaguardar o bom funcionamento dos equipamentos alimentados pelo SEE minimizando a quantidade de cargas deslastradas. Deve ser realizado tendo em conta um equilíbrio entre a carga deslastrada e a quantidade de potência ativa poupada nos geradores, caso contrário, esta metodologia deixa de ser benéfica e pode provocar um agravamento do estado do sistema.

2.2.3.17 Relés de mínimo de frequência

Durante as fases iniciais do processo de RS, quando o controlo do sistema é essencialmente manual, as variações toleradas de tensão e frequência são maiores. Nestas condições, os sistemas de proteção automatizados para responder a pequenas perturbações na tensão e frequência atrasam o processo. Por este motivo, deve ser realizada uma desativação seletiva de alguns sistemas de proteção de modo a reduzir o atraso causado por estes no processo. Esta desativação deve ser feita com um cuidado adicional pois, caso contrário, pode comportar desvantagens à RS, se os desvios de frequência forem maiores do que os esperados.

2.2.4 Controlo na RS

2.2.5 Primeiro passos da RS

Durante as primeiras etapas do processo de RS em sistemas com unidades de produção térmicas, é necessário ligar algumas cargas para que exista equilíbrio entre a potência gerada e consumida, de acordo com os limites técnicos mínimos das unidades de geração. Caso o sistema possua

poucas unidades de produção, este apresentará uma inércia pequena, pelo que o reestabelecimento de cargas deve ser feito utilizando pequenos incrementos, de forma a não violar os limites de frequência da rede. [14]

As linhas de alta tensão são energizadas durante esta etapa do procedimento, e consequentemente, a tensão em toda a rede aumenta, tal como a potência reativa. Devido a isso, os dispositivos de compensação que produzem potência reativa, como os bancos de condensadores, devem ser desligados e os equipamentos que absorvem potência reativa devem ser ligados, durante este período. Estas manobras são realizadas para que os limites de absorção reativa das unidades de geração sejam respeitados. Os transformadores devem estar ligados com alguma carga resistiva para evitar fenómenos ferro-ressonantes e os rácios dos transformadores reguladores devem permanecer fixos durante esta primeira fase do processo. Por fim, as linhas de transmissão devem ser energizadas de acordo com a produção mínima de energia reativa no sistema. [14]

Durante esta parte do processo de RS, o controlo secundário de frequência está por norma desativado. No entanto, cada carga que é incrementada no sistema resulta num decréscimo da frequência do mesmo. Devido a isso, é indispensável controlar manualmente a potência das unidades, à medida que o número de cargas restauradas aumenta.

2.2.6 Passos finais da RS

Na etapa mais tardia do processo de RS, existe um maior número de unidades de produção sincronizadas e, consequentemente, a inércia do sistema é maior. Por causa desta problemática, é possível incrementar um maior número de carga em cada iteração do processo. Durante esta, é provável que o controlo automático de frequência esteja de novo ligado. Então, a principal preocupação no controlo do processo muda de foco, sendo agora o reestabelecimento de carga.

Os rácios dos transformadores reguladores podem agora variar quando a carga restaurada se tornar mais importante. O *set-point* da tensão dos geradores deve ser colocado perto do valor nominal dos mesmos. Pode ser necessário desligar equipamentos de compensação que absorvem energia reativa e ligar dispositivos que a produzam. O objetivo é aumentar a tensão do sistema que se encontra, agora, num estado mais perto do restauro total.

2.2.7 Estratégias de reposição

Grande parte dos planos de RS são adaptáveis a diferentes tipos de colapsos de modo a permitir a melhor utilização possível de mão-de-obra, materiais, e equipamentos, tendo em conta a severidade do colapso em questão. Estes planos devem ser flexíveis de maneira a acomodar procedimentos novos e atualizados. Deste modo, os planos de RS devem ser revistos periodicamente de forma a incorporar mudanças organizacionais, experiências recentes, novas práticas da indústria, equipamentos e modificações na configuração do sistema. Estes devem também reconhecer cargas críticas e atribuir-lhes prioridades durante o processo de RS. Instalações médicas, policiais, quartéis de bombeiros, centros de comunicação, centros de transporte, e instalações de águas e de esgotos são exemplo de cargas críticas que requerem um atendimento prioritário. [17]

A organização e implementação do plano de RS irão contribuir substancialmente para o seu sucesso, sendo que existem duas estratégias básicas para sua concretização, a *top-down* e a *bottom-up*. Numa abordagem bastante simplificada afirma-se que a estratégia *top-down* é uma estratégia mais complexa mas que garante uma melhor eficácia e a estratégia *build-down* é uma estratégia mais simples. [18]

Na estratégia *top-down* parte do sistema de alta-tensão é colocado em tensão antes de ser realizada a sincronização da maior parte dos geradores da rede. Ou seja, este processo tem como prioridade restabelecer todo o sistema de transmissão, sendo que, de seguida, procura restaurar cargas. Como a energização de linhas de transmissão introduz uma elevada quantidade de energia reativa na rede, é necessário a existência de máquinas, cargas ou outros equipamentos capazes de absorver essa mesma energia reativa. Esta metodologia pode provocar o aparecimento de sobretensões, em particular, no ponto mais distante do circuito energizado. Por norma, este efeito é controlado colocando em serviço em simultâneo um componente consumidor de potência reativa no ponto mais longínquo. É então fundamental, ao utilizar esta metodologia, regular cuidadosamente os equipamentos produtores de potência reativa. Os diferentes passos seguidos por esta estratégia podem ser resumidos do seguinte modo: [6][13][18][2]

- Avaliação do estado do SEE;
- Energização das linhas de alta tensão evitando sobretensões e ressonâncias harmónicas;
- Fornecimento da energia necessária ao arranque às unidades de geração sem capacidade de *black-start*;
- Sincronização das diversas unidades quando estas ficam operacionais;
- Restauro completo das cargas do sistema e retorno ao funcionamento normal.

Na estratégia *bottom-up*, não se realiza nos instantes iniciais a energização do sistema de transmissão de alta tensão, evitando assim potências sobretensões. Nesta metodologia, opta-se por colocar em tensão pequenas partes da rede com capacidade de arranque autónomo e de produção de potência reativa necessária à concretização do processo. Após a realização de algumas sincronizações de pequenos subsistemas, o sistema pode apresentar uma reactância série relativamente elevada, pelo que devem ser colocadas em tensão linhas paralelas com o objetivo de reduzir este efeito. Os diferentes passos seguidos por esta estratégia podem ser resumidos do seguinte modo: [6][13][18][2]

- Avaliação do estado do SEE;
- Divisão do sistema em subsistemas, para que cada um possua pelo menos uma unidade de geração com capacidade de *black-start*;
- Fornecimento da potência necessária ao arranque a geradores sem a capacidade de *black-start*;

- Interconexão de centrais de produção entre os diversos subsistemas;
- Sincronização dos subsistemas e fornecimento de carga de forma a estabilizar todas as unidades;
- Energização de linhas de alta tensão, quando a capacidade de absorção de energia reativa for adequada.

2.2.8 Características das centrais de produção

As centrais de produção desempenham um papel fundamental no processo de RS de um SEE, pelo que é necessário conhecer as características das mesmas e o papel que cada central toma nesse processo. No que diz respeito ao processo de RS, a diferença mais importante entre as diversas centrais é que as centrais térmicas apresentam um tempo de arranque bastante superior ao das centrais hídricas ou eólicas. [18]

2.2.8.1 Centrais hídricas

O tempo de arranque de uma central hídrica é bastante reduzido (alguns minutos) e é capaz de diminuir ou aumentar a sua potência produzida muito rapidamente. Isto faz com que este tipo de centrais seja bastante eficiente a funcionar com cargas parciais e por estas mesma razão são frequentemente utilizadas para regular a frequência e tensão no SEE. Não podemos esquecer que a água armazenada nas barragens possui um preço, que, embora baixo, é regulado de acordo com o preço de eletricidade expectável no momento em que esta vai ser turbinada. Também existem restrições legais acerca dos níveis mínimos e máximos que o nível da água pode tomar na barragem, devido a preocupações ambientais. [18]

2.2.8.2 Centrais eólicas

O componente principal das centrais eólicas são os aerogeradores, sendo que existem vários tipos, e cada um possui características bastante diferentes. Estes produzem energia através do vento e este poderá nem sempre estar disponível. Devido a isso, os planos de RS não podem depender somente deste tipo de recurso. Em SEE que possuam uma produção elevada de energia eólica, existem menos centrais, prontas para arrancar, em caso da ocorrência de um *blackout* do que num caso contrário. Os aerogeradores mais antigos utilizam o controlo por *stall* com geradores de indução ligados diretamente. Estes não conseguiam controlar a sua potência ativa e reativa gerada, tornando-os difíceis de utilizar em processo de RS. Os aerogeradores mais recentes (DFIG) são controlados por conversores de frequência eletrónicos, tornando o seu uso em processo de RS facilitado. Os aerogeradores modernos são capazes de controlar quer a frequência quer a tensão através de eletrónica de potência e, por norma, arrancam automaticamente dez minutos após a ocorrência de um *blackout*[18]. Alguns aerogeradores podem mesmo agir como um STATCOM quando não existe vento, para ajudar a regular a tensão durante a RS. Logo, é possível afirmar que as centrais eólicas podem apresentar diversos benefícios ao processo de RS. [18]

2.2.8.3 Turbinas a *diesel*

Estas turbinas são usadas em grande parte, como centrais de reserva. Apresentam um arranque e uma regulação bastante rápidos, a sua construção é barata, no entanto o seu funcionamento é caro. Frequentemente possuem capacidades de *blackstart* baseadas numa bateria. [18]

2.2.8.4 Turbinas a gás

Este tipo de turbinas é usada para unidades maiores do que as a *diesel* e apresenta um tempo de arranque de cerca de cinco a trinta minutos[18]. O seu controlo pode ser feito de forma rápida e, devido a isso, estas turbinas são assiduamente utilizadas como geradores de emergência. O seu custo de construção é barato, no entanto o seu funcionamento é caro, tal como os geradores a *diesel*.

2.2.8.5 Turbinas a vapor

Estas turbinas são maioritariamente utilizadas por centrais nucleares e a carvão e são responsáveis pela produção de cerca de 80% da eletricidade produzida no globo. Possuem um tempo de arranque bastante longo devido ao tempo que é necessário para aquecer a caldeira. Estas podem residir em três estados diferentes, de acordo com a sua preparação para entrar em serviço, frio (tempo de arranque entre quatro a quarenta e oito horas), quente (tempo de arranque entre trinta minutos e duas horas) e preparado (tempo de arranque de cinco minutos). A capacidade destas turbinas de regular a sua potência ativa é bastante lenta, particularmente quando esta sofre um aumento. As centrais baseadas nestas turbinas necessitam de uma quantidade considerável de potência externa para conseguirem arrancar, sendo que um arranque a quente só é possível se a unidade receber quantidade de potência necessária do exterior dentro de um tempo definido.

2.2.8.6 Ciclo combinado

As turbinas a gás, vapor e motores *diesel* geram uma grande quantidade de calor. Esse calor pode ser utilizado para aquecimento local, tornando assim o processo mais eficiente. Estas funcionam, por norma, de acordo com a procura de calor, sendo que a eletricidade é um produto extra.

2.2.8.7 Produção distribuída

Na teoria, a produção em pequena escala, consegue arrancar e responder mais rapidamente a um *blackout* do que grandes centrais. Isto deve-se ao facto de sistemas pequenos serem mais dinâmicos ao nível mecânico e térmico do que as grandes centrais. No entanto, apetrechar equipamentos capazes de controlar situações de RS tem um custo elevado. Outro problema que esta produção apresenta à RS é facto de o controlo das unidades ser feito pelo dono delas e não pelo operador da rede. Isto pode levar a uma situação em que as unidades de PD ficam operacionais mais cedo do que o desejável durante uma fase sensível do processo de RS. A grande diversidade

das unidades da PD, sendo que cada uma apresenta características diferentes torna o trabalho do operador de rede durante o processo de RS, bastante mais difícil.

2.3 Meta-heurísticas

2.3.1 Introdução

A utilização das teorias de Darwin para a resolução de problemas de forma automatizada surgiu em meados de 1950 e, somente dez anos depois, nos anos sessenta é que surgiram três interpretações distintas desta ideia em três diferentes locais. Somente na década de 90 é que estes três diferentes métodos foram unificados sob o nome de "Computação Evolucionária"(CE).

O conceito inicial de programação evolucionária foi introduzido por Lawrence J. Fogel (1964) [19], que apresentou a "Programação Evolucionária"(PE). John Holland [20] apresentou o seu método sob o nome de "Algoritmos Genéticos"(AG). Estes métodos marcaram o seu lugar em variados artigos, sendo que a publicação mais relevante foi o livro "Artificial Intelligence Through Simulated Evolution" (1966). I. Rechenberg e H.-P Schwefel [21], na Universidade Técnica de Berlim, desenvolveram em conjunto, o que é apelidado, hoje em dia, de "Estratégias Evolucionárias"(EE). Este trabalho provocou um estímulo intenso na atividade de outros investigadores, resultando em interessantes resultados teóricos e práticos. Estas áreas evoluíram separadamente durante algum tempo, e desde, então que estes domínios têm sido a razão de intensos estudos por parte da comunidade científica. A evolução da tecnologia permitiu alimentar esta crescente curiosidade, pois através do uso de computadores mais avançados tornou-se possível desenvolver aplicações práticas, tais como a evolução de programas informáticos. A CE é hoje utilizada para resolver problemas multidimensionais e otimizar sistemas de forma mais eficiente. [2]

Este tipo de algoritmos tem como principal objetivo determinar a solução ótima de um problema independentemente da natureza das variáveis. Desta forma, é constituído um conjunto de soluções possíveis (indivíduos) para o problema. De seguida, é realizada uma avaliação de todos os indivíduos através de uma função a otimizar, sendo que os que obtiverem uma melhor classificação serão selecionados para a próxima etapa, a reprodução. O procedimento continua, e são gerados novos indivíduos a partir dos que foram selecionados anteriormente, criando assim uma nova geração. Esta é de novo avaliada, selecionando-se de novo os melhores indivíduos presentes na mesma. Todo este processo é repetido, iteração após iteração até que um critério de paragem pré-determinado seja satisfeito. Este é geralmente um número máximo de iterações ou gerações, ou quando algum indivíduo atingir um valor da função objetivo aceitável. No final do processo é encontrado o melhor indivíduo do problema, sendo que este representa a solução do problema de otimização em causa.

Os diversos métodos de CE apresentam algumas diferenças entre si, sendo que as principais são apresentadas de seguida:

- Na representação (cromossoma) de uma solução ou indivíduo;
- Na descodificação dos cromossomas;

- No processo de seleção;
- Na reprodução.

Recentemente surgiram novas metodologias de meta-heurísticas também baseadas em fenômenos naturais. Uma destas foi a Simulated Annealing proposta por Kirkpatrick, Gellet e Vecchi (1983) e Cerny (1985)[22], que foi inspirada na formação de cristais. James Kennedy e Russel Eberhardt [23] desenvolveram o PSO (Particle Swarm Optimization) inspirando-se no comportamento de enxames de insetos, bandos de pássaros e cardumes de peixes. Este algoritmo designa por partículas, o conjunto de soluções a otimizar, sendo que estas evoluem no espaço das alternativas procurando descobrir a solução ótima. Posteriormente, foi introduzido o EPSO (Evolutionary Particle Swarm Optimization) que é não mais do que um método híbrido de duas técnicas de otimização pertencentes à família das meta-heurísticas, a CE e o PSO. Este foi desenvolvido por Vladimiro Miranda [24] e possibilita ao PSO possuir características auto adaptativas.

2.3.2 Computação Evolucionária

2.3.2.1 Algoritmos Genéticos

A principal diferença entre esta meta-heurística e os algoritmos do tipo EP e ES é o conceito de cromossoma. Este é utilizado para codificar soluções numa sequência de bits, apresentando semelhanças aos conceitos biológicos codificação do ADN e da genética.

A forma mais simples de um AG envolve três tipos de operadores:

- **Seleção** – Este operador seleciona na população os cromossomas que se irão reproduzir. Quanto melhor for a avaliação do cromossoma, maior será a probabilidade de este se reproduzir;
- **Cruzamento** – Este operador escolhe aleatoriamente um *locus* (local de um dado cromossoma onde estão localizados certos genes) e troca as subsequências antes e depois desse *locus* entre os dois cromossomas, gerando assim dois descendentes. Por exemplo, caso as *strings* 10000100 e 11111111 fossem cruzadas depois do terceiro *locus* seriam gerados os seguintes descendentes 10011111 e 11100100. Este operador imita a recombinação entre dois organismos que possuem um só cromossoma;
- **Mutação** – Este operador troca aleatoriamente bits de 0 para 1 ou de 1 para 0 num dado cromossoma. Por exemplo, a *string* 00000100 pode ser mutada na sua segunda posição gerando o resultado 01000100. A mutação pode ocorrer em cada posição de uma *string* embora este acontecimento possua uma probabilidade bastante baixa.

Um exemplo de uma resolução de um problema utilizando um AG simples é descrito de seguida:

- **1** – Gera-se aleatoriamente uma população de n cromossomas de um bit;
- **2** – Através de uma função *fitness* é atribuído um valor a cada cromossoma correspondente à sua avaliação;

- **3** – Os seguintes passos (a, b e c) são repetidos até serem gerados n descendentes;
 - a** – Seleciona-se um par de cromossomas de população atual, sendo que a probabilidade de serem selecionados está relacionada com o valor da sua avaliação. O mesmo cromossoma pode ser selecionado mais do que uma vez;
 - b** – Através da probabilidade pc decide-se se irá ocorrer cruzamento entre os dois cromossomas, caso este não tome lugar, formam-se dois descendentes iguais aos progenitores. Caso este aconteça, escolhe-se aleatoriamente um locus entre dois cromossomas, de forma a criar dois novos descendentes;
 - c** – Os dois descendentes gerados sofrem mutação através da probabilidade pc (a probabilidade de mutação) e são colocados na nova população;
- **4** – A população atual é substituída pela gerada;
- **5** – Voltar ao passo 2.

Cada iteração deste processo é denominada de geração e este tipo de algoritmos realiza, por norma, entre 50 e 500 iterações. No final do processo, a população deverá conter vários cromossomas com valores de avaliação bastante bons. O comportamento das gerações em cada processo pode ser muito diferente, isto deve-se ao carácter aleatório inerente ao processo.[25]

2.3.2.2 Estratégias de Evolução

Existem diversas variedades de modelos de ES, no entanto, a que será discutida nesta secção será o modelo canónico $(\mu, \kappa, \lambda, \rho)$ ES [2].

Este modelo foi proposto por Schwefel [21]. e possui os seguintes parâmetros:

- μ – Número total de progenitores presentes numa geração;
- κ – Número de gerações a quem um indivíduo sobrevive;
- λ – Número de descendentes originados numa geração;
- ρ – Número de progenitores de um indivíduo.

Desta forma, pode definir-se como uma Estratégia de Evolução do tipo $(\mu, 0, \mu, 2)$ ES um modelo que possua dois progenitores por indivíduo com base em mutação e em que os pais não sobrevivam para a geração seguinte. Ou seja, através da variação dos parâmetros que definem este modelo podem ser gerados diferentes processos.

Um indivíduo é constituído por uma sequência de parâmetros estratégicos (PE) e parâmetros objeto (PO), sendo que $s_n s$ e $o_n o$ correspondem ao número de parâmetros estratégicos e parâmetros objeto respetivamente.

$$PE = (s_1, s_2, \dots, s_n s) e PO = (o_1, o_2, \dots, o_n o) \quad (2.1)$$

Os parâmetros estratégicos, por norma, dizem respeito a parâmetros α e a desvios padrão σ para as distribuições. Os primeiros estabelecem correlações entre mutações em diferentes variáveis. Os últimos descrevem a probabilidade de mutação que pode ser diferente ou global em cada uma *no* dimensões ou variáveis de um indivíduo.

Os parâmetros objeto dizem respeito às variáveis do problema, ou seja, as variáveis que constituem o conjunto de populações (fenótipo). Quando um parâmetro é fixado $\kappa > 1$, é frequente utilizar um contador de vida remanescente, isto é, um contador do número de gerações,

O algoritmo geral de uma ES pode ser definido através no diagrama presente na imagem 2.3



Figura 2.3: Algoritmo geral de uma meta-heurística do tipo ES

Tal como é possível observar na imagem 2.3, o processo é constituído por diferentes etapas. Durante a introdução de dados, são definidos os parâmetros e operadores, o contador de gerações é iniciado e é introduzida uma população aleatória de elementos. De seguida, realiza-se uma

avaliação à adaptação de todos os indivíduos da população. Posteriormente faz-se a reprodução através de recombinação e mutação de forma a gerar descendentes. O processo continua com a avaliação, que calcula de novo a adaptação dos indivíduos gerados, e com a seleção. Esta seleciona com base nos valores calculados na etapa anterior. Por fim, realiza-se um teste para determinar se o processo estará concluído ou não. Caso este tenha chegado ao fim, é apresentada a solução final, caso contrário é incrementado uma unidade no contador de gerações e o processo retorna à etapa de reprodução.

2.3.2.3 Programação Evolucionária

De forma a criar um modelo de PE é necessário que se defina uma população de indivíduos, representados pelas suas variáveis, e uma função de adaptação.

A mutação realiza-se de forma que este modelo tenha influência direta nas variáveis de um indivíduo ou na solução do problema. Em cada geração, as variáveis reais sofrem o efeito de perturbações Gaussianas de valor médio zero. Devido a isso as variações elevadas tornam-se pouco prováveis, enquanto as de valor reduzido tornam-se bastante prováveis.

Com esta metodologia, torna-se possível que as variáveis reais tendam continuamente para o ótimo, evitando a natureza discreta de um código binário de representação genética. No entanto, somente através de indivíduos que sofram importantes mutações é que é possível explorar novos campos no espaço das decisões.

O processo realizado pelos algoritmos do tipo ES e PE é bastante semelhante, sendo que, a principal diferença prende-se com a etapa de seleção. Enquanto que, na ES, este processo é elitista, ou seja, o melhor indivíduo de cada geração é selecionado para a seleção seguinte, na PE adotou-se a seleção por torneio estocástico. O modelo mais simples é o T(1,2) [2], este método apresenta três passos distintos. No primeiro os indivíduos são escolhidos em pares aleatoriamente. De seguida, comparam-se os valores de adaptação dos diversos indivíduos sorteados. Por fim, seleciona-se o melhor indivíduo que irá integrar na próxima geração, este possui uma probabilidade elevada mas diferente de um. Este processo é repetido até que se forme uma nova população de indivíduos mutados.

Um exemplo de um algoritmo PE simples pode ser definido utilizando a figura 2.3. O esquema utilizado é o mesmo do que o usado para os algoritmos do tipo ES, no entanto, apresenta algumas diferenças, também pode ser utilizado para descrever o funcionamento deste tipo de algoritmos. Em primeiro lugar, durante a introdução de dados, o contador de gerações é iniciado e é introduzida uma população. De seguida, é avaliada a adaptação dos diferentes indivíduos da população. A próxima etapa é a reprodução, durante a qual a população é duplicada e segue-se o passo correspondente à mutação. Esta traduz-se em introduzir perturbações estocásticas na nova população incluindo o parâmetro estratégico σ . Os indivíduos mutados são então avaliados com base no seu valor de adaptação e selecionados a partir desses mesmo valor através de torneio estocástico. Por fim, é aplicado um teste para determinar se o processo estará concluído. Caso este tenha chegado ao fim é apresentada a solução final, caso contrário é incrementado uma unidade no contador de gerações e o processo retorna à etapa de reprodução.

2.3.3 Enxames de partículas

2.3.3.1 Descrição de meta-heurísticas do tipo PSO

O algoritmo PSO foi inspirado pelo comportamento de bandos de aves, cardumes de peixe, enxames de insetos e outros grupos. Nestes grupos, o comportamento de cada indivíduo é simultaneamente influenciado por fatores próprios e por fatores resultantes do comportamento dos outros.

Esta meta-heurística foi introduzida por Kennedy e Eberheart [23] e procura otimizar problemas através de um conjunto de soluções, denominadas de partículas, que evoluem no espaço das alternativas. Estas movem-se sob a ação de três vetores que as influenciam:

- **Cooperação** – Atrai a partícula no sentido da melhor posição encontrada pelo enxame até ao momento;
- **Memória** – Atrai a partícula no sentido da melhor posição encontrada por essa mesma durante a sua vida;
- **Hábito ou inércia** – Impele a partícula a seguir a direção previamente tomada.

De seguida, é descrito o modelo simples do algoritmo PSO. Para um determinado problema de otimização, cada partícula corresponde a uma alternativa de solução. A constituição de uma partícula i presente numa população constituída por n partículas pode ser descrita da seguinte forma: [2]

- Um vetor de posição X_i ;
- Um vetor de velocidade V_i ;
- Um vetor de memória b_G , correspondente à melhor posição descoberta durante a sua vida;
- Um valor de função objetivo referente à posição atual X_i ;
- Um valor de função objetivo relativo à melhor posição b_i descoberta pela partícula.

Através da regra apresentada 2.2, uma partícula i é capaz de alterar a sua posição de X_i para X_i^{novo} num determinado instante de tempo t (correspondente a uma determinada iteração)

$$X_i^{novo} = X_i + V_i^{novo} \quad (2.2)$$

V_i^{novo} é a nova velocidade da partícula i , isto é, o vetor que mostra a mudança de posição da partícula i , e é dada por:

$$V_i^{novo} = V_i + R.Wm_i(b_i - X_i) + R.Wc_i(b_G - X_i) \quad (2.3)$$

onde

- Wm_i – Matriz diagonal de pesos do termo de memória da partícula i , sendo que, Wm_{kk}^i é o peso para a dimensão k do termo de memória;
- Wc_i – Matriz diagonal de pesos do termo de cooperação da partícula i , sendo que, Wc_{kk}^i é o peso para a dimensão k do termo de cooperação;
- b_i – Melhor solução (posição no espaço) descoberta durante a vida da partícula i ;
- b_G – Melhor solução (posição no espaço) descoberta pelo enxame até ao momento presente;
- R – Número aleatório entre 0 e 1.

Os valores dos pesos que afetam os vários termos do problema são por sua vez influenciados pelo produto por números aleatórios. Consequentemente, é gerada uma perturbação na trajetória de cada partícula que demonstrou ser benéfica para a exploração e para a descoberta de uma solução ótima. Os pesos controlam a eficácia do PSO, caso se aumente o seu valor, a otimização do problema será menos minuciosa, pois a procura pela solução ótima efetuará variações de posição maiores. Se se verificar o contrário, ou seja, uma diminuição nos valores dos pesos, a procura será mais minuciosa.

Na figura 2.4, apresenta-se uma ilustração da composição dos vários termos, resultando no movimento de uma partícula i no espaço das soluções.

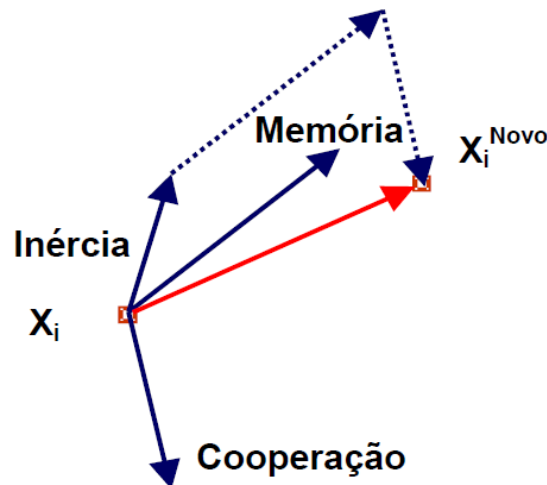


Figura 2.4: Influência da inércia, memória e cooperação no movimento de uma partícula i [2]

2.3.3.2 Descrição de meta-heurísticas do tipo EPSO

O EPSO é um método que foi baseado em duas técnicas de otimização pertencentes à família das meta-heurísticas, a CE e o PSO. Esta metodologia permite que um algoritmo do tipo PSO

possua características auto-adaptativas, não requerendo, assim, a afinação manual dos seus parâmetros. Este método foi desenvolvido por Vladimiro Miranda [24] e tanto pode ser empregue na resolução de problemas relacionados com SEE como em outras áreas.

Neste método, os indivíduos ou conjunto de alternativas são também designados por partículas, sendo que cada um é composto por um conjunto de parâmetros estratégicos e parâmetros objeto $[X, W]$. O esquema geral do EPSO pode ser definido da seguinte forma: [2]

- **Replicação** – Cada partícula é clonada $r-1$ vezes, em que r é o número de descendentes desejado;
- **Mutação** – É realizada mutação nos parâmetros estratégicos das partículas clonadas;
- **Reprodução** – Por cada partícula existente é gerado uma descendente, de acordo com a equação do movimento;
- **Avaliação** – A adaptação de cada descendente é avaliada;
- **Seleção** – Cada grupo de r descendentes é analisado e a melhor partícula de cada um é selecionada para formar a próxima geração.

Desta forma, em cada iteração são gerados r descendentes, sendo que, somente um sobrevive e irá fazer parte da geração seguinte. A regra do movimento desta metodologia pode ser descrita da seguinte forma.

Dada uma partícula X_i , uma nova partícula X_i^{novo} é originada a partir de:

$$X_i^{novo} = X_i + V_i^{novo} \quad (2.4)$$

$$V_i^{novo} = W_i V_i + W m_i (b_i - X_i) + W c_i (b_G - X_i) \quad (2.5)$$

A formulação apresentada regista bastante semelhanças à do PSO clássica, que preserva os seus termos de inércia, cooperação e memória. No entanto, os pesos que neste caso são tomados como parâmetros estratégicos irão sofrer mutação. Um peso W pode ser definido da seguinte forma:

$$W_{ik} = W_{ik} [\text{Log}N(0, 1)]^\tau \quad (2.6)$$

onde,

- $\text{Log}N(0, 1)$ representa uma variável aleatória com uma distribuição Lognormal derivada da distribuição Gaussiana $N(0, 1)$, com um valor de variância igual a um e média zero.
- τ representa um parâmetro de aprendizagem, fixado externamente e que controla a amplitude das mutações, ou seja, quanto mais pequenos forem os valores, maior a probabilidade de valores próximos de um.

Ao comparar esta metodologia com o algoritmo PSO clássico é possível registar uma diferença interessante. Esta diferença reside no tratamento do b_G , ou seja, o melhor ponto descoberto até ao momento pelo enxame. Em numerosos processos regista-se que, nas etapas finais do processo, o peso do termo referente à inércia tende a diminuir. Deste modo, a progressão fica em grande parte dependente do termo de cooperação. Tendo em conta que a melhor posição descoberta pelo enxame até ao momento ainda não foi encontrada, procura-se orientar o movimento das partículas para uma vizinhança próxima dessa posição, em vez de as atrair para ela. Sendo assim, dada posição descoberta pelo enxame até ao momento (b_G), perturba-se a informação antes de ser aplicada a regra do movimento utilizando a seguinte equação 2.7.

$$b_g^* = b_g + w_{i4}^* N(0, 1) \quad (2.7)$$

Esta equação 2.7 introduz um novo peso W_{i4} que, tal como outro qualquer parâmetro estratégico, também será objeto de mutação e seleção. Este procedimento, permite que o processo auto-adaptativo não estabilize mesmo que as partículas tenham convergido todas para a mesma região do espaço e se encontrem muito próximas.

Na figura 2.5, pode ser observado a ilustração da reprodução de uma partícula no EPSO. Esta é influenciada pelos termos inércia, cooperação e memória, uma partícula i localizada em X , numa iteração κ gera um descendente na iteração $\kappa + 1$. Relativamente ao termo de cooperação, a atração realizadas para uma vizinhança definida por uma distribuição Gaussiana do ótimo corrente b_G . [2]

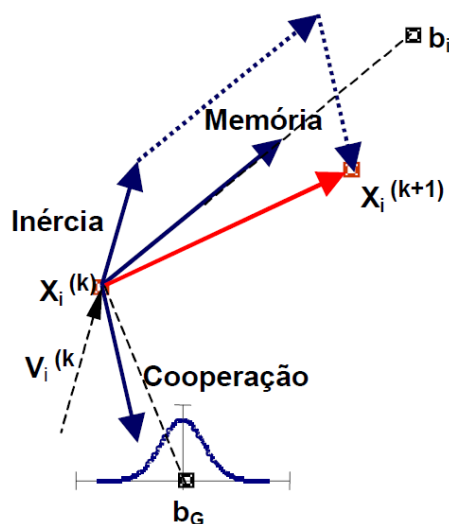


Figura 2.5: Ilustração da reprodução de uma partícula no EPSO [2]

2.3.4 Simulated annealing

O Simulated Annealing (SA) foi inspirado por uma analogia com formação de cristais. A ideia por detrás desta metodologia provém de um artigo publicado por Metropolis et al em 1953

[26]. O algoritmo presente neste artigo simulava o arrefecimento de um material imerso num banho a altas temperaturas, sendo este processo conhecido como recozimento. Se sólido imerso for aquecido além do seu ponto de fusão, as propriedades da sua estrutura vão depender do tempo de arrefecimento. Se for arrefecido suficientemente devagar, regista-se a formação de cristais de tamanho considerável. No entanto, caso este sofra um arrefecimento rápido, os cristais vão conter imperfeições. O algoritmo demonstrado nesse artigo simulava o processo de arrefecimento ao baixar gradualmente a temperatura do sistema, até que este convergisse para um estado estável.

Os primeiros autores a estabelecer a ponte entre o recozimento de sólidos com os problemas de otimização foram Kirkpatrick et al em 1983 [22] . Estes substituíram a energia por uma função objetivo e os estados físicos do sistema por soluções de um problema de minimização. A minimização é realizada iniciando o processo com uma temperatura alta, sendo que esta é agora um parâmetro de controlo, "derretendo" o espaço de soluções, de seguida a temperatura sofre uma redução gradual até que o sistema atinja um estado estável, consequentemente, uma solução ótima.

Este método aceita ou rejeita manobras geradas aleatoriamente baseando-se numa probabilidade relacionada com a temperatura de recozimento, que pode aceitar manobras que modificam o valor da função objetivo no sentido contrário do desejado a longo prazo. Num problema de minimização global, uma manobra que aumenta o valor da função objetivo pode ser aceite como parte de uma série de manobras cuja tendência é reduzir o valor dessa mesma função. Este tipo de comportamentos pode apresentar resultados positivos, evita que o método fique preso num mínimo local, garantindo assim uma melhor solução. Na figura 2.4, é possível observar um exemplo de um caso em que uma meta-heurística do tipo SA pode ser superior a outras. Isto deve-se ao facto de que esta possui características que evitam que o algoritmo fique preso em mínimos locais.

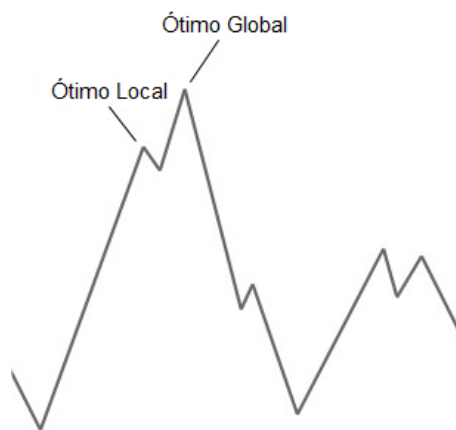


Figura 2.6: Evolução de uma função objetivo ao longo do tempo

Um exemplo simples de um SA pode ser descrito da seguinte forma:

- 1 – Introduzir a temperatura inicial e uma solução aleatória;
- 2 – Gerar uma nova solução ao efetuar uma pequena mudança na anterior;

- **3** – Decide-se se a nova solução é aceite ou não;
- **4** – A temperatura é ajustada e caso a condição de paragem tenha sido satisfeita o algoritmo termina, caso contrário retorna-se ao passo 2.

Capítulo 3

Modelização do sistema e definição dos casos de estudo

3.1 Introdução

Neste capítulo será feita uma descrição das ferramentas de simulação e computação utilizadas, a definição dos casos de estudo e a modelização dos vários componentes do sistema utilizado para conceber a aplicação. Esta aplicação tem por objetivo realizar planos de reposição de serviço para diferentes redes, sendo que, a versão A não utiliza nenhuma meta-heurística para apoiar a identificações dos passos do processo de reposição e a versão B usa.

Ao iniciar os trabalhos, surgiu a necessidade de escolher o *software* mais indicado para a tarefa a realizar. Para esta ser levada a bom termo seria necessária uma ferramenta capaz de realizar as seguintes funções:

- Desenvolvimento de algoritmos;
- Conceção de um interface gráfico;
- Resolução de trânsito de potências;
- Comunicação bilateral entre os algoritmos desenvolvidos e os resultados obtidos através do trânsito de potências.

Tendo em conta que o processo de RS engloba diversas operações na rede, e que, cada uma delas modifica o comportamento do sistema, tal como a sua configuração, podendo até alterar o seu estado. Devido a isso, torna-se imprescindível realizar uma monitorização cuidada das diversas variáveis do SEE. Várias opções foram estudadas, entre estas constam programas, como o PowerWorld, PSSE ou o EUROSTAG. No entanto, após pesar os diversos prós e contras de cada ferramenta, concluiu-se que a melhor opção seria utilizar o MATLAB para o desenvolvimento de algoritmos e para a conceção do interface gráfico e a extensão do mesmo e o MATPOWER, para a resolução do trânsito de potências. Esta ferramenta permite realizar efectuar simulações em regime estacionário e apresenta a manobrabilidade necessária para executar os diversos elementos

de uma sequência de RS. Possibilita também analisar os resultados e os valores que as diversas variáveis apresentam até que o processo de RS esteja completo. Ao comparar esta última aplicação com as outras analisadas é possível concluir que apresenta algumas limitações. Nomeadamente no que diz respeito à autenticidade na representação do sistema elétrico, pelo que, ao utilizar esta ferramenta, os componentes representados não apresentarão um comportamento bastante próximo da realidade. No MATPOWER também não é possível analisar os fenómenos transitórios rápidos em tensão e frequência. Por esses motivos, este trabalho não irá analisar cenários em que este fenómeno influencia o processo de reposição de serviço. Todavia, como o Matlab foi a ferramenta que, de acordo com a pesquisa realizada, preenchia todos os requisitos inicialmente apresentados, a autenticidade da simulação teve que ser sacrificada, não sendo realizada assim uma simulação dinâmica.

Foram contemplados dois casos de estudo neste trabalho, sendo que estes diferem na forma como o plano de reposição de serviço é gerado. Em ambos os casos, a construção do plano para a reposição de serviço esqueleto da rede, ou seja, linhas e transformadores, é realizada de uma forma automatizada. Em cada passo, o programa procura executar manobras, numa simulação da rede em questão, de acordo com as prioridades estabelecidas, que não provoquem uma alteração de estado do sistema, ou seja, que não violem nenhum limite do sistema elétrico. A diferença entre ambos os casos reside na sequência de reposição de cargas. No caso A, esta é feita através de um método de decisão empírico e no caso B é utilizada uma meta-heurística do tipo PSO para apoiar a identificações dos passos do processo de reposição.

3.2 Software

3.2.1 MATLAB

O MATLAB é uma linguagem de alto nível e um ambiente interativo para computação numérica, visualização e programação. A utilização desta plataforma é simples pelo que os problemas e soluções são expressos através das notações matemáticas mais frequentes. Este sistema utiliza como elemento básico um vetor que não precisa de dimensionamento. Este facto permite ao utilizador resolver problemas numa fração do tempo que seria necessário, utilizando uma linguagem como o C ou o Fortran. O MATLAB também é frequentemente utilizado como base para o ensino de computação no ensino técnico, sendo que, cerca de 1000 livros escolares utilizam-no como veículo de ensino. Esta ferramenta é um produto da “*The Mathworks*” e as suas principais aplicações são as seguintes: [27]

- Linguagem de alto nível para computação numérica, visualização e desenvolvimento de aplicações;
- Ambiente interativo para exploração iterativa, *design* e resolução de problemas;
- Funções matemáticas para álgebra linear, estatística, análise de Fourier, filtragem, otimização, integração numérica, e resolução de equações diferenciais;

- Interface gráfico para representação desejada, e ferramentas capazes de criar gráficos personalizados;
- Ferramentas para melhorar a qualidade de código e maximizar a sua performance;
- Ferramentas para construir aplicações com interfaces gráficos personalizados;
- Funções para integrar algoritmos baseados no MATLAB com aplicações externas e linguagens como C, Java, .NET, e Microsoft Excel.

3.2.2 MATPOWER

O MATPOWER [28] é uma extensão do MATLAB concebida para resolver problemas de trânsito de potências e de despacho ótimo. É uma ferramenta de simulação cuja utilização, maioritariamente feita por alunos e professores. Esta é relativamente fácil de utilizar e de modificar. Embora existam ferramentas capazes de modelizar sistemas elétricos de uma forma mais eficaz e realista, esta aplicação demonstrou ser a mais indicada para o trabalho em mão. Isto, é particularmente útil para projetos que necessitem de uma aplicação capaz de resolver trânsitos de potências, criar algoritmos e conceber interfaces gráficos de uma forma simples sem recorrer a diferentes tipos de *software*.

Esta extensão foi desenvolvida na Universidade de Cornell por Ray D.Zimmerman, Carlos E.Murillo-Sánchez e Degjan Gan sob a orientação de Robert J.Thomas. Muitos outros têm vindo a contribuir para o desenvolvimento do MATPOWER ao longo dos anos, sendo que este continua a ser mantido sobre a direção de Ray Zimmerman.[29]

3.2.3 GUIDE

O GUIDE (graphical user interface design environment) é uma ferramenta do MATLAB que permite ao utilizador criar interfaces gráficos para aplicações personalizadas. Ao utilizar esta ferramenta o utilizador pode definir o *layout* do interface gráfico. De seguida, o GUIDE gera o código em MATLAB relativo ao interface criado, sendo que o utilizador pode modificar o código de acordo com o comportamento desejado para o interface gráfico.

3.3 Funcionamento da aplicação

3.3.1 Introdução

Realizaram-se duas versões da aplicação. Ambas utilizam a mesma metodologia para efetuar o restabelecimento de serviço no esqueleto da rede (linhas de transmissão, transformadores e geradores), contudo, as duas versões utilizam diferentes métodos para realizar a reposição de serviço das cargas.

A ideia inicial para o desenvolvimento da aplicação era utilizar uma meta-heurística para apoiar a decisão na criação de planos de RS. No entanto, após a realização de alguma pesquisa e

diferentes versões da aplicação, foi decidido que só se iria usar uma meta-heurística para apoiar a decisão na criação de planos de RS durante o processo de reposição de carga, pelo que, se resolveu utilizar uma estratégia do tipo *top-down*. Nesta estratégia a reposição de serviço do esqueleto da rede é feita em primeiro lugar e só se for necessário, para garantir da estabilidade da rede, é que se efetua o preenchimento de cargas. Optou-se por só usar uma meta-heurística para apoiar a decisão na criação de planos de RS durante o processo de reposição de carga e não em todo o processo pois as manobras realizadas ao construir o esqueleto da rede são dependentes umas das outras. Por exemplo, para que seja possível ligar a linha de transmissão que vai do barramento 6 ao 17, da rede apresentada em anexo B, a linha de transmissão que vai do barramento 3 ao 6 tem que estar ligada. Este facto causa graves problemas durante a fase de mutação da meta-heurística, pois, ao realizar uma mutação sem restrições na sequência do plano de RS, geram-se vários planos incorretos. Por exemplo, tal como se pode observar na tabela 3.1, caso a sequência 1 presente na tabela seja mudada ocorre uma mudança no segundo passo do processo de RS. Ao ocorrer essa mutação estaria a gerar-se uma sequência incorreta, que provocaria um erro ao simular o trânsito de potências. Posto isto, utilizando a metodologia de restabelecimento de serviço no sistema utilizada para conceber a aplicação não seria possível aplicar uma meta-heurística para apoiar a decisão durante a etapa de restabelecimento de serviço do esqueleto da rede.

Tabela 3.1: Exemplo de mutação num plano de RS

Sequência 1	Sequência 1 Mutada
Ligar linha de transmissão 3 - 6	Ligar linha de transmissão 3 - 6
Ligar linha de transmissão 6 - 17	Ligar linha de transmissão 17 - 19
Ligar linha de transmissão 17 - 10	Ligar linha de transmissão 17 - 10

Para que a elaboração dos planos de RS fosse possível, foi necessário simular as manobras constituintes do plano em questão, utilizando o MATPOWER. Devido a isso, é necessária uma simulação de como a rede se encontra após a ocorrência de um *blackout*. De seguida, os algoritmos utilizados simulam o comportamento de todas as manobras possíveis de realizar, no estado em que a rede se encontra naquele momento. Desta forma, analisa-se qual a manobra que poderá integrar o plano de RS e que será executada na simulação. Os algoritmos criados continuam com este processo até que a simulação da rede em que ocorreu um *blackout* se encontre totalmente restaurada. Desta forma, simula-se o processo de RS numa rede elétrica de transmissão.

3.3.2 Restabelecimento de serviço do esqueleto da rede

O restabelecimento de serviço do sistema é realizado através de um método de decisão empírica, ou seja, coloca a melhor opção possível em cada iteração, de acordo com as prioridades definidas. Este processo é igual para ambas as versões da aplicação, quer seja a A ou a B. O seu funcionamento pode ser observado na figura 3.1. Como este algoritmo pode gerar planos com tempo total de reposição diferentes, decidiu-se que este seria executado cerca de quinze vezes de forma a garantir o menor tempo de reposição de serviço do plano gerado.

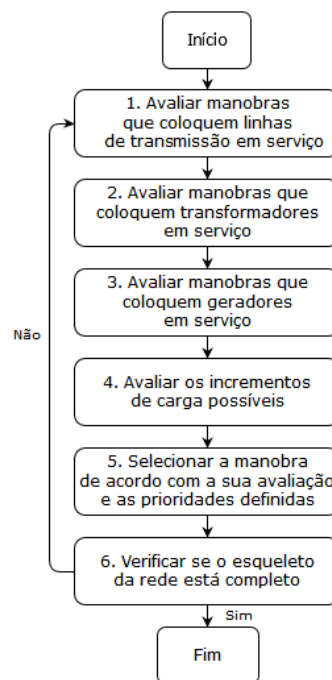


Figura 3.1: Diagrama de alto nível do funcionamento do algoritmo que restabelecimento de serviço no esqueleto de um SEE

Para restabelecer o serviço no esqueleto da rede, ficou determinada a utilização de uma metodologia que gera todas as opções possíveis de manobras na rede, em cada instante, procedendo também à sua avaliação. As manobras são realizadas, adicionando a manobra em questão à simulação, registrando as alterações que estas provocam no sistema e de seguida, retira-las da simulação, de forma a que esta fica inalterada. A avaliação traduz-se num número, e é tanto maior, quanto maior for o número e gravidade da violação de limites por parte dessa mesma manobra. De seguida, é originado um número que contém a informação da manobra gerada, e outro que diz respeito à avaliação da mesma. Por fim, as opções geradas são comparadas, e de acordo com as prioridades definidas e a avaliação de cada uma é escolhida uma opção que irá fazer parte do plano de RS do SEE em questão. O ciclo que é iniciado na etapa dois até à cinco corresponde a uma iteração do algoritmo presente na figura 3.1.

As prioridades definidas para este algoritmo foram as seguintes:

- 1 – Opção com avaliação igual a zero;
- 2 – Energizar transformadores;
- 3 – Inicializar geradores;
- 4 – Energizar linhas de transmissão;
- 5 – Incrementar carga.

De acordo com estas prioridades, uma opção, que codifica uma manobra que integrará o plano de RS do SEE em questão, só poderá fazer parte deste se não violar qualquer limite do SEE, ou seja, se o número correspondente à avaliação da respetiva manobra for igual a zero. Caso este número seja igual a zero, procura-se energizar os transformadores. No entanto, se não existir nenhuma manobra que energize um transformador, com um valor de avaliação associado igual a zero, avaliam-se as opções existentes para energizar linhas de transmissão. Esta lógica continua, sendo que, só em último caso se efetua um incremento de carga, e este só é realizado se não violar qualquer limite técnico da rede. Os incrementos de carga também poderão ser feitos quando já foi dada a ordem de inicialização de um gerador, e o sistema está à espera do seu arranque. Neste período de tempo, pode ocorrer uma situação em que a única manobra possível seja incrementar carga. No entanto, também neste caso, o incremento de carga realizado nunca poderá violar qualquer limite técnico.

3.3.2.1 Codificação das manobras

Durante cada iteração do algoritmo descrito na figura 3.1 são geradas várias opções, que se traduzem em manobras. Estas opções são codificadas através de um número para que possam ser analisadas mais facilmente durante todos os algoritmos desenvolvidos na aplicação. Esta codificação é descrita de seguida.

3.3.2.1.1 Transformadores

Na tabela 3.2 é possível observar três exemplos da forma como a ligação de transformadores à rede foi codificada dentro dos algoritmos da aplicação. No terceiro passo é introduzido na rede o transformador que vai do barramento dezassete ao dezasseis. Este número pode ser decomposto em três parcelas, sendo que, cada uma contém informação sobre a ação. A primeira parcela, corresponde aos algarismos presentes nos milhões, nas centenas de milhar e dezenas de milhar, ou seja, o número 100. Este número é comum aos três passos presentes na tabela 3.2 e codifica o tipo de ação que será realizada. Neste caso trata-se da energização de um transformador. A segunda parcela corresponde aos algarismos dos milhares e centenas. Esta parcela codifica o barramento de origem do transformador em questão. No passo três, indica que o barramento de origem é o dezassete. A terceira e última parcela corresponde aos algarismos das dezenas e unidades. Esta codifica o barramento de chegada do transformador. No passo três da tabela 3.2, este indica que o barramento de chegada do transformador é o dezasseis. A rede utilizada encontra-se em anexo B.

Tabela 3.2: Exemplo de codificação da introdução de transformadores na rede através de um número

Passo	Manobra
1	1000301
2	1000504
3	1001716

3.3.2.1.2 Linhas

Na tabela 3.3 é possível observar três exemplos da codificação utilizada na energização de linhas de transmissão. Tal como é possível observar, esta codificação é semelhante à utilizada para a ligação de transformadores à rede (3.3.2.1.1), sendo que ambas estão divididas em três parcelas. Neste caso, a segunda e terceira parcelas codificam o mesmo tipo de informação que codificavam a segunda e terceira parcelas para a ligação de transformadores à rede. Estas parcelas codificam, assim, o barramento de origem e o de chegada da linha de transmissão, respetivamente. No entanto, existe uma diferença entre os dois modos de codificação. Esta reside na primeira parcela do número, ou seja, nos algarismos presentes nos milhões, nas centenas de milhar e dezenas de milhar. Esta parcela, em vez de tomar o valor 100, toma o valor 200, que codifica a ação que energiza uma linha de transmissão. A rede utilizada encontra-se em anexo B.

Tabela 3.3: Exemplo de codificação da energização de linhas de transmissão através de um número

Passo	Manobra
1	2000304
2	2000306
3	2000617

3.3.2.1.3 Geradores

Tabela 3.4: Exemplo de codificação da ligação de geradores através de um número

Passo	Manobra	Tempo (s)
1	3000007	200
2	700007	500
2	3000016	600
2	7000016	1800

A metodologia usada para codificar a inicialização de geradores nos algoritmos do programa é semelhante à utilizada anteriormente (3.3.2.1.1, 3.3.2.1.2). Este método também usa as mesmas parcelas para codificar a informação inerente à manobra em questão. No entanto, neste caso, a segunda parcela não codifica qualquer tipo de informação. A primeira parcela correspondente aos algarismos presentes nos milhões, nas centenas de milhar e dezenas de milhar e toma o valor de 300. Este número representa a ação que inicializa um gerador na rede. Devido ao seu tempo de arranque, este só entrará em serviço após esse mesmo período de tempo. Quando este tempo estiver concluído, o gerador pode ser utilizado. Essa ação é codificada através da primeira parcela do código, esta toma, agora, o valor de 700. Esta manobra não é considerada para avaliação, dado que, é uma consequência da inicialização de um gerador. A terceira parcela, presente nos algarismos das dezenas e unidades codifica o barramento em que esse gerador se encontra. Um exemplo desta codificação pode ser observada no passo dois da tabela 3.4. Neste passo, o número 3000016

representa a ação que inicializa o gerador presente no barramento 16, e o número 7000016 diz respeito à conclusão do tempo de arranque desse gerador, e à possibilidade desse mesmo gerador ser usado para dar resposta a variações de carga no sistema. A rede utilizada encontra-se em anexo B.

3.3.2.1.4 Incrementar cargas

O número utilizado para codificar o incremento de cargas é constituído por quatro parcelas. Na tabela 3.5 é possível analisar algumas codificações que representam incrementos de cargas na rede. Na tabela 3.5, no passo 1 encontra-se uma manobra representada pelo número 41016024004, que pode ser decomposto em quatro parcelas, apresentadas de seguida:

- **1º** – 41 – Esta parcela codifica o início da ação de incrementar cargas no sistema;
- **2º** – 016 – Esta parcela representa o barramento em que se encontra a carga em que será feito o incremento, que, neste caso é o 16;
- **3º** – 024 – Esta parcela codifica a quantidade de carga ativa que será incrementada na carga em questão;
- **4º** – 004 – Esta parcela representa a quantidade de carga reativa que será incrementada na carga em questão.

As seguintes manobras presentes na tabela 3.5 utilizam a mesma metodologia que foi descrita acima. Contudo, como pode ser incrementada potência em várias cargas no mesmo incremento, surge a necessidade da existência de uma metodologia capaz de codificar uma manobra que incrementa potência em várias cargas num só incremento de potência na rede. Desta forma, utiliza-se o número 41 para codificar o primeiro incremento de potência num barramento de um dado incremento de potência na rede. O número 40 é utilizado para o segundo e os seguintes incrementos que compõem esse incremento de potência na rede. Deste modo, é possível codificar incrementos de potência que incidem em duas ou mais cargas da rede. Isto pode ser analisado na tabela 3.5, em que o passo um, dois e três representam um incremento de potência na rede que provoca um aumento de potência em três cargas. A rede utilizada encontra-se em anexo B.

Tabela 3.5: Exemplo de codificação do incremento de cargas através de um número

Passo	Manobra
1	41016024004
2	40009024004
3	40011026010
4	41007066026

3.3.2.1.5 Incrementar potência nos geradores

Para cada incremento de potência realizado na rede existe uma resposta dada por parte dos geradores disponíveis. Deste modo, a carga adicionada à rede é dividida por todos os geradores disponíveis na rede.

Tabela 3.6: Exemplo de codificação de um incremento de carga e da resposta dada pelos geradores através de uma sequência de números

Passo	Manobra
1	41007023004
2	5020003.76346313
3	6020000.65451533
4	5010004.57332229
5	6010000.79536040
6	5160009.14664457
7	6160001.59072080
8	5070005.51657001
9	6070000.95940348

Na tabela 3.6, é possível observar um incremento de carga presente no passo um, e a resposta dada pelos geradores nos passos seguintes. A metodologia utilizada para codificar a informação inerente às manobras de aumento de potência nos geradores foi semelhante à usada anteriormente. Este método utiliza três diferentes parcelas para codificar diferentes tipos de informação, sendo que estas são, de seguida, descritas, utilizando o passo seis da tabela 3.6. A rede utilizada encontra-se em anexo B.

- **1^a** – 5 ou 6 – Esta parcela codifica a ação a realizar, caso tome o valor de 5 significa que irá ocorrer um incremento de carga ativa. Se tomar o valor 6 significa que irá ser efetuado um incremento de carga reativa;
- **2^a** – 16 – Esta parcela representa o barramento em que se encontra o gerador em que será feito o incremento que, neste caso, é o 16;
- **3^a** – 0009.14664457 – Esta parcela codifica a quantidade de carga ativa que será incrementada no gerador em questão.

3.3.2.2 Avaliação das manobras

Cada opção gerada pelo algoritmo presente na figura 3.1 é constituída por um número que apresenta informação codificada e um número sobre a sua avaliação. A avaliação de cada manobra incide em três fatores, nos limites de absorção máxima de potência reativa dos geradores, dos níveis de tensão dos barramentos da rede e na sua frequência.

3.3.2.2.1 Avaliação dos limites de absorção máxima de potência reativa dos geradores

O processo de verificar se uma manobra, por norma, na energização de linhas de transmissão, violou os limites de absorção máxima de potência reativa dos geradores pode ser observado na figura 3.2. Este processo verifica se os limites de absorção máximos de potência reativa foram quebrados, e, por cada limite que seja violado, incrementa o valor três à avaliação associada à manobra em questão.

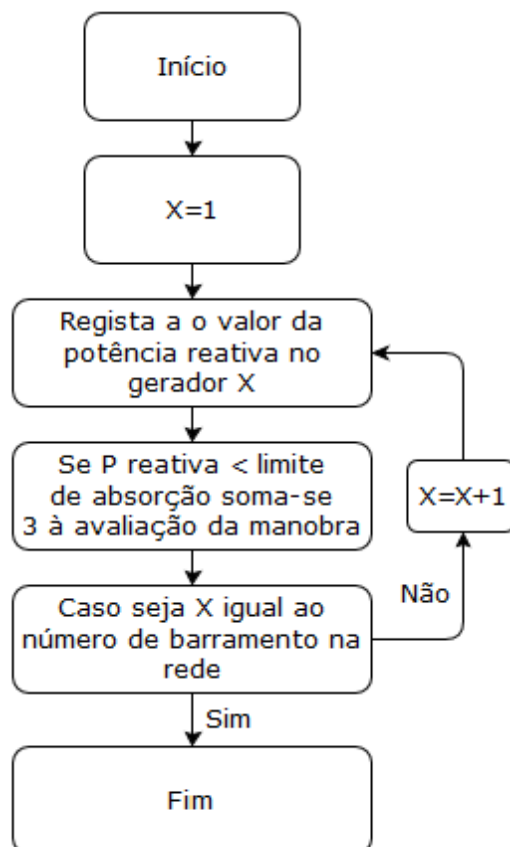


Figura 3.2: Diagrama de alto nível do funcionamento da função responsável por verificar se determinada manobra não viola os limites de absorção máxima de potência reativa dos geradores

3.3.2.2.2 Avaliação dos limites de tensão da rede

O algoritmo desenvolvido para avaliar os limites de tensão na rede pode ser observado na figura 3.3. Este analisa a tensão em cada barramento e verifica se esta quebrou algum limite pré-definido. Caso algum limite tenha sido violado, é incrementado cinco à avaliação associada à manobra em questão.

A avaliação da variação da tensão, causada por uma determinada manobra, realizada nesta etapa, possui algumas limitações. Uma destas limitações deve-se ao facto de que, se considera que após cada manobra do plano de RS estar concluída, o controlo secundário do SEE entra

em ação fazendo com que os valores de tensão da rede retornem aos nominais. A outra limitação ocorre devido ao *software* utilizado, o MATPOWER. Como este não analisa as variações de tensão transitórias, estas não são consideradas neste trabalho.

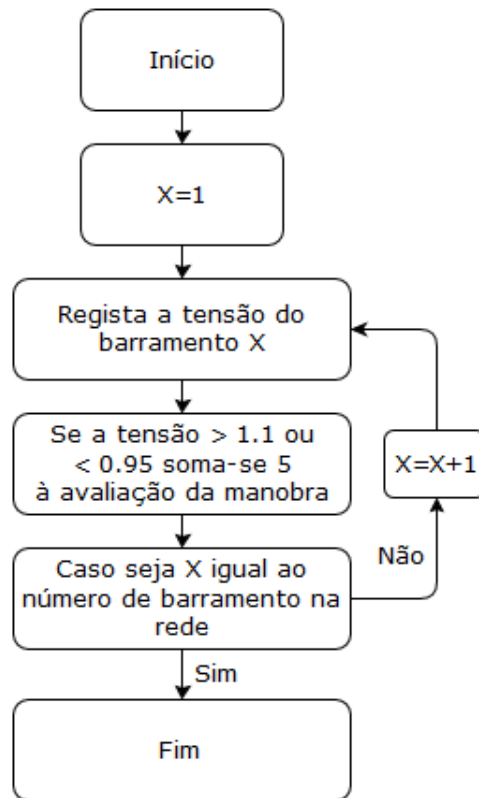


Figura 3.3: Diagrama de alto nível do funcionamento da função responsável por avaliar os níveis de tensão dos barramentos da rede

3.3.2.2.3 Avaliação da frequência da rede

Durante a etapa respectiva ao incremento de carga do algoritmo representado na figura 3.1, é realizada verificação da frequência, de forma a garantir que não é gerada nenhuma opção de incrementos de carga com um valor de avaliação associado não nulo. Deste modo, de cada vez que é gerada uma opção que iria violar os limites de frequência do sistema, o algoritmo emite um aviso que reduz a carga presente nessa opção. Se mesmo assim a nova opção ainda violar os limites de frequência do sistema, a opção sofre uma nova diminuição na carga. Este processo é repetido até que seja gerada uma opção que não ultrapasse o limite de frequência do sistema. O algoritmo utilizado nesta etapa é semelhante ao utilizado na etapa de avaliação de tensão, no entanto, em vez de ser avaliada a tensão nos barramentos, é avaliada a variação da frequência no sistema induzida pela manobra.

Tal como na secção 3.3.2.2.2, a avaliação da variação da frequência, provocada por uma determinada manobra, realizada nesta etapa, possui algumas limitações. Em primeiro lugar, considera-

se que após cada manobra do plano de RS estar concluída, o controlo secundário do SEE entra em ação, fazendo com que os valores de frequência da rede retornem aos nominais. Esta etapa possui ainda outra limitação, esta não avalia as variações de frequência transitórias no sistema. Isto deve-se a limitações do *software* utilizado, o MATPOWER. A forma de cálculo dos desvios de frequência provocados por determinadas manobras é explicada na secção 3.3.2.3.4.

3.3.2.3 Funcionamento detalhado do algoritmo

O algoritmo responsável pela construção do esqueleto da rede é constituído por seis etapas diferentes, sendo que, após a sua conclusão, é apresentada uma sequência possível, que não viola qualquer limite técnico, para a construção do esqueleto da rede em questão. Estas etapas são explicadas com algum detalhe de seguida.

3.3.2.3.1 Etapa 1 - Avaliação de manobras que coloquem linhas de transmissão em serviço

A etapa um, presente na figura 3.1, denominada de "Avaliar manobras que coloquem linhas de transmissão em serviço", é descrita com maior nível de detalhe na figura 3.4.

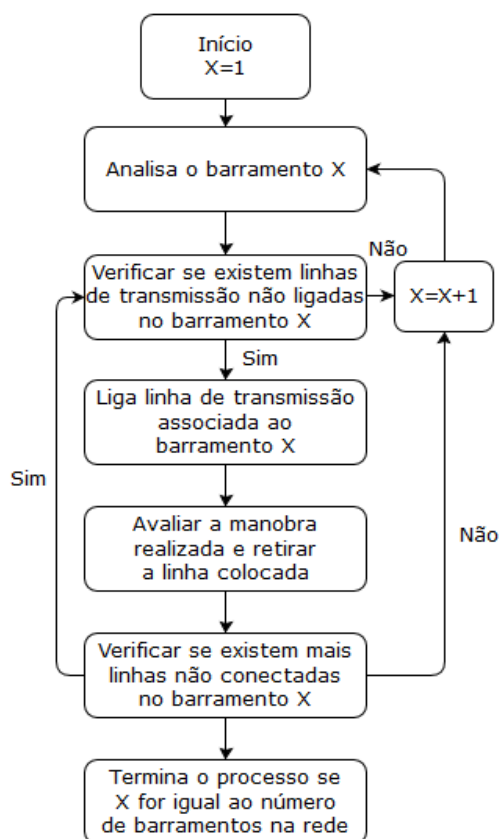


Figura 3.4: Diagrama de alto nível do funcionamento da função responsável por gerar opções que se traduzem em colocar linhas de transmissão em serviço

O processo descrito na figura 3.4, é iniciado no primeiro barramento da matriz que contém informação sobre os barramentos que estão presentes na rede. O número deste barramento é registado e verifica-se se ele se encontra presente em alguma linha de transmissão que ainda não esteja energizada no SEE. De seguida, se a condição anterior se verificar, essa linha é energizada e colocada, caso contrário analisa-se o barramento seguinte. Caso uma linha tenha sido energizada, é feita uma avaliação do estado da rede, com o objetivo de verificar se algum limite foi violado. A linha de transmissão colocada é então retirada, voltando, assim, a rede ao estado em que se encontrava no momento anterior. Posteriormente, verifica-se se existe outra linha de transmissão não energizada associada a este barramento, caso isto aconteça, o processo repete-se. O algoritmo é terminado quando todos os barramentos presentes na rede, naquele momento, tiverem sido analisados.

3.3.2.3.2 Etapa 2 - Avaliação de manobras que coloquem transformadores em serviço

O processo descrito acima e presente na figura 3.4 é semelhante ao utilizado durante a etapa dois, correspondente à avaliação de manobras que coloquem transformadores em serviço. A única diferença neste processo é o elemento (transformadores) que se procura analisar e a função de avaliação presente nestes casos.

3.3.2.3.3 Etapa 3 - Avaliação de manobras que coloquem geradores em serviço

O processo realizado nesta etapa também é semelhante ao da 3.3.2.3.1, sendo que a diferença entre os dois é o elemento que será avaliado, que neste caso é um gerador.

3.3.2.3.4 Etapa 4 - Avaliação dos incrementos de carga possíveis

A figura 3.5 descreve o funcionamento da função responsável por gerar opções que se traduzem em incrementar carga na rede. Esta função é capaz de gerar opções que se traduzem na reposição de serviço de uma ou mais cargas na rede e no correspondente aumento de produção por parte dos geradores. Este algoritmo é representado pela etapa número quatro na figura 3.1.

A carga incrementada em cada iteração do algoritmo presente na figura 3.5 requer uma resposta por parte dos geradores elétricos presentes na rede. Como existem vários geradores na rede, torna-se necessário dividir o incremento de carga entre estes. Esta divisão é feita de acordo com o estatismo de cada gerador, sendo que o cálculo deste valor é calculado através da equação 3.1.

$$Estatismo_x = (R_x / Pn_x) / f \quad (3.1)$$

onde

- R – Representa o estatismo do gerador em questão (Hz p.u. / p.u. MW);

- P_n – Representa a potência nominal do gerador;
- f – Frequência nominal da rede.

Para que se possa calcular a variação de frequência induzida pelo aumento de carga é necessário conhecer a soma dos diversos estatismos dos geradores. Esta soma pode ser calculada através da equação 3.2.

$$1/Estatismo_{Total} = 1/Estatismo_1 + 1/Estatismo_2 + 1/Estatismo_3 \quad (3.2)$$

Através deste valor é possível calcular a variação de frequência resultante de um incremento de carga utilizando a equação 3.3.

$$f = -Estatismo_{Total} \cdot C_{Ativa} \quad (3.3)$$

onde

- C_{Ativa} – Representa o valor total de carga ativa do incremento;
- f – Representa o valor da variação de frequência resultante de um incremento.

Obtendo o valor relativo à variação de frequência induzida por um dado incremento de carga e possuindo o valor do estatismo de cada gerador, é possível calcular o valor de carga que será atribuída a cada gerador através equação 3.4.

$$\Delta P_x = -\Delta f \cdot Estatismo_x \quad (3.4)$$

onde

- Δf – Representa a variação de frequência provocada por um incremento de potência nas cargas;
- $Estatismo_x$ – Representa o estatismo do gerador x ;
- P_x – Representa a variação de potência que o gerador x irá sofrer.

O processo é iniciado ao restaurar por completo uma carga aleatória da rede. De seguida, é realizada uma verificação da variação da frequência na rede provocada pelo incremento de carga. Caso a variação de frequência criada por esse incremento de carga tenha violado os limites de frequência estipulados, é feita uma redução no valor de potência ativa e reativa desse incremento. Esta redução no valor de potência é feita, até que o valor destas atinja o zero ou a opção em questão pare de violar o limite de frequência da rede. Caso nenhum limite seja quebrado, procede-se à reposição de serviço de outra carga aleatória da rede. Se esta nova carga restaurada quebrar

o limite de frequência da rede, procede-se à mesma redução de carga descrita anteriormente. Este processo é repetido até que seja gerada uma opção que contenha o máximo de carga ativa que seja possível incrementar no sistema.

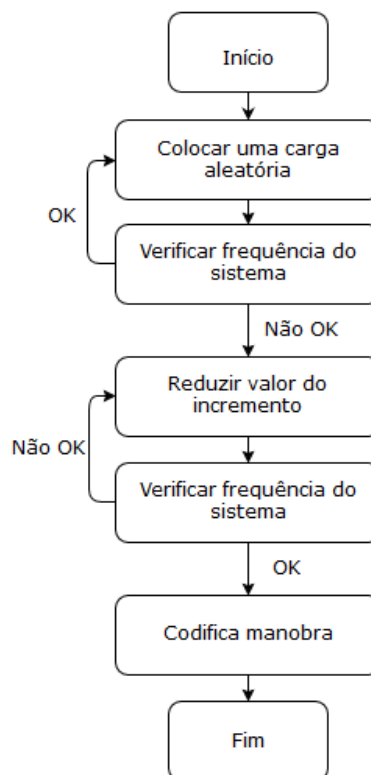


Figura 3.5: Diagrama de alto nível do funcionamento da função responsável por gerar opções que se traduzem em incrementar carga na rede

3.3.2.3.5 Etapa 5 - Avaliação das opções geradas

Esta etapa decide qual das opções geradas anteriormente é que irá integrar o plano de RS. Todas as opções geradas nas etapas anteriores são analisadas de acordo com a avaliação associada a cada uma e as prioridades definidas na secção 3.3.2. O primeiro critério tomado é a nulidade do número (avaliação) associada a cada manobra. Caso este número seja nulo, seguem-se as prioridades previamente definidas. Ou seja, caso exista uma manobra de energização de uma linha de transmissão e uma de ligação de um transformador na rede, tendo ambas o seu valor de avaliação nulo, a manobra que é colocada no plano de RS é a relativa à linha de transmissão. Por fim, caso existam duas manobras, por exemplo, duas manobras de energização de linhas de transmissão, cuja avaliação seja nula, a manobra que será selecionada aleatoriamente, entre essas duas opções.

3.3.2.3.6 Etapa 6 - Verificar se o esqueleto da rede está completo

Durante esta etapa, é feita uma verificação de forma a certificar que o esqueleto da rede está restaurado. Caso este esteja completo, o algoritmo presente na figura 3.1 termina. Se isto não acontecer e o esqueleto não estiver completo, o algoritmo regressa à etapa um e volta a gerar opções de manobras.

3.3.3 Caso A

Este algoritmo tem como objetivo a realização de planos de RS para as cargas de uma rede cujo esqueleto já esteja restaurado, ou seja, este algoritmo apresenta-se como um complemento do algoritmo presente na figura 3.1. Neste caso, é utilizado um método idêntico para realizar o incremento de cargas ao utilizado em 3.3.2.3.4, sendo que as únicas manobras que este gera são incrementos de carga e o correspondente incremento de produção nos diversos geradores para dar resposta à variação de carga.

3.3.4 Caso B

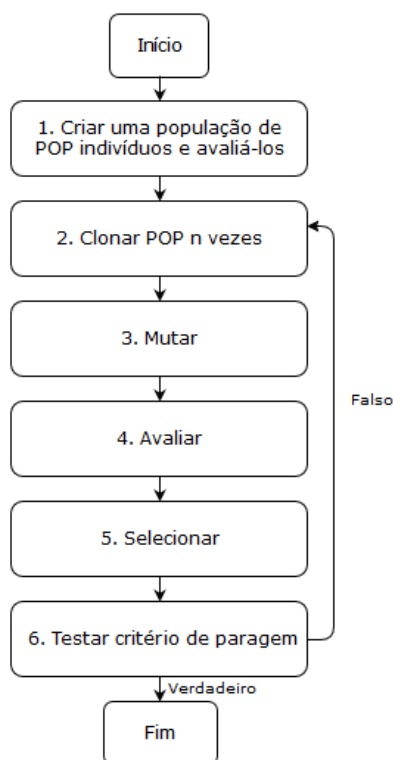


Figura 3.6: Diagrama de alto nível do funcionamento da função responsável por gerar opções que se traduzem em incrementar carga na rede utilizando o PSO

No caso B, foi utilizado uma meta-heurística do tipo PSO para determinar o valor ideal de carga que seria acrescentado em cada manobra, sendo que esta pode ser distribuída por diferentes

cargas. Foram testadas outras estratégias, usando outras metas-heurísticas, no entanto, a utilizada neste caso provou ser a que obteve melhores resultados. Na figura 3.6, pode ser observado o diagrama de alto nível que explica o funcionamento do algoritmo utilizado. Este é composto por seis etapas. Após a sua conclusão é gerado um relatório com os valores de carga a ser incrementados em cada manobra do plano de RS. O objetivo deste algoritmo é aproximar esses valores dos valores máximos reais de carga a serem incrementados em cada manobra. Este algoritmo analisa se qualquer manobra gerada pelo mesmo viola os limites de frequência. No entanto, a análise dos limites de tensão não foi considerada. Isto deveu-se ao facto de que, quando este algoritmo é iniciado, o esqueleto da rede já está restaurado. Isto leva a que a probabilidade de violação dos limites de tensão seja bastante reduzida. A análise de tensão também não foi considerada, pois ao introduzir mais uma variável no problema de otimização, os resultados obtidos e o tempo de convergência do algoritmo seriam piores.

3.3.4.0.7 Etapa 1 - Criar uma população de POP indivíduos e avaliá-los

Nesta etapa, é gerada uma população de indivíduos com um número especificado pelo utilizador (POP). O algoritmo presente nesta etapa gera, em cada iteração, um valor que corresponde ao número máximo de carga que pode ser incrementada na rede em questão num dado momento, sem violar os limites de frequência da mesma. No entanto, de forma a gerar uma população aleatória, o limite de frequência da rede é escolhido aleatoriamente, a cada iteração do algoritmo, de um intervalo constituído por uma distribuição uniforme com valores entre $[x-0.2, x+0.2]$, em que x é o valor de variação de frequência permitida escolhida pelo utilizador. Desta forma, gera-se um enxame de partículas, sendo que, cada uma delas é representada pelo valor que indica a carga que deve ser incrementada em cada manobra. Cada partícula será avaliada e os valores seguintes serão registados.

- X_i – Corresponde à posição atual da partícula;
- b_i – Corresponde à melhor posição descoberta durante a vida do enxame;
- b_G – Corresponde à melhor posição descoberta pela partícula.

3.3.4.0.8 Etapa 2 - Clonar POP n vezes

Esta etapa copia cada sequência e as suas respetivas avaliações n vezes, sendo que n corresponde ao número de descendentes desejado e que é introduzido pelo utilizador.

3.3.4.0.9 Etapa 3 - Mutar

A mutação é realizada utilizando as equações 2.2 e 2.3 presentes no capítulo 2, na página 29. Desta forma, o valor das partículas de cada sequência gerada na etapa 2 é assim alterado,

aproximando-se de um valor ideal. Os pesos utilizados para a equação do movimento tomam os valores de 0,5 para o peso que irá ser multiplicado na parcela respetiva à melhor posição descoberta durante a vida do enxame. O peso presente na parcela correspondente à melhor posição descoberta pela partícula toma o valor 8. Esta diferença dos pesos existe para que a parcela correspondente à melhor posição descoberta pela partícula influencie mais o movimento da partícula do que a parcela correspondente à melhor posição encontrada durante a vida do enxame. Isto deve-se ao facto de, neste problema, a melhor posição descoberta pelo enxame poder não ser a melhor posição para todas as partículas.

3.3.4.0.10 Etapa 4 - Avaliar

Nesta etapa, os diferentes indivíduos, quer os descendentes quer os progenitores, são avaliados de acordo com a equação 3.5, que representa a função *fitness* deste problema de otimização. Este problema de otimização reside na minimização do valor desta função *fitness*. A tensão não é considerada, dado que no caso considerado, os limites de tensão nunca são violados.

$$fitness = N_{freq} \cdot 100000 + N_{manobras} \cdot 100 - N_{carga} \cdot 2 \quad (3.5)$$

onde

- N_{freq} – Relacionado com as violações de frequência que a sequência em questão induz na rede. Este é calculado ao registar a soma das diferenças entre os valores de variação de frequência que provocaram violações nos limites e o limite de frequência introduzido pelo utilizador;
- $N_{manobras}$ – Este valor corresponde ao número de manobras (partículas) presente em cada sequência;
- N_{carga} – Este valor está relacionado com o valor da carga de cada manobra e a sua posição na sequência. Este é calculado multiplicando o valor da carga de cada manobra por um coeficiente que diminui de posição para posição da sequência. Ou seja este valor valoriza sequências que incrementam um valor alto de carga nas primeiras posições da sequência;
- $fitness$ – Corresponde ao valor da função *fitness*.

Os valores associados a cada componente da função *fitness* representam o peso de cada parâmetro que a constitui. Em primeiro lugar, é necessário certificar que a sequência em questão não viola os limites de frequência estabelecidos. A prioridade seguinte é minimizar o número de manobras realizadas. Por fim, analisa-se se as sequências introduzem um valor alto de carga nas suas manobras iniciais.

3.3.4.0.11 Etapa 5 - Selecionar

O problema de otimização reside na minimização do valor da função *fitness* apresentada na etapa quatro. Todas sequências geradas na etapa correspondente à mutação apresentam uma característica em comum com os seus progenitores, sendo que esta não é alterada ao longo das várias mutações. Esta semelhança é o número de manobras, e devido a isso, o processo de seleção é feito através da competição entre progenitores e descendentes, evitando assim que o espaço de soluções percorra uma direção em que se podem ignorar soluções próximas do ideal. O enxame selecionado será aquele que entre progenitores e descendentes possua o valor mais baixo de avaliação.

3.3.4.0.12 Etapa 6 - Testar critério de paragem

Na etapa seis, é executado um teste que decidirá se o algoritmo deve parar e apresentar o resultado final ou se deve continuar a realizar iterações. Esta decisão é feita observando a evolução do comportamento da função *fitness* ao longo das gerações. Em primeiro lugar, o algoritmo executa cinquenta iterações, sendo que, a realização deste número mínimo de iterações previne que o algoritmo fique preso num mínimo local. De seguida, o critério de paragem pode ser testado, este avalia a variação no valor da função *fitness* de geração para geração. Caso este valor não varie ao longo de cinquenta gerações, o algoritmo para e é apresentado o resultado final. Esta medida também previne que o algoritmo fique preso em mínimos locais, garantindo assim um melhor resultado apresentado.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Considerações

Durante a elaboração dos vários algoritmos constituintes da aplicação, foi feita uma análise cuidadosa, tendo sido realizados vários testes de forma a procurar o método que garantisse melhores resultados. Estes deveriam ter o menor tempo de reposição, alimentando assim todas as cargas do sistema o mais rapidamente possível. Nas várias etapas do processo de RS, existem diferentes opções que podem ser tomadas, pelo que a produção de uma ferramenta de elaboração de planos de RS é uma tarefa complexa. Deste modo, é necessário possuir um bom conhecimento de todo o tipo de redes existentes e dos seus componentes, de forma a simplificar o processo e prever possíveis situações que podem gerar instabilidade. Este conhecimento também é necessário para que seja possível criar uma ferramenta que apresente uma boa versatilidade, podendo assim funcionar em diferentes redes. A elaboração destes planos é realizada tendo em conta os limites técnicos do SEE, tais como os limites estabelecidos para a tensão e a frequência. Ao ocorrer um aumento de potência fornecida às cargas irá, ocorrer uma variação de frequência que, caso seja suficientemente grande, pode provocar uma violação nos limites de frequência. Tendo isto em conta, a otimização do processo de RS foi realizada para que, quer a frequência, quer a tensão do sistema não ultrapassem os limites operacionais da rede. No entanto, a janela de variação destes processos foi extensamente utilizada para maximizar a qualidade dos resultados gerados, cumprindo de forma eficaz os objetivos desejados.

Fizeram-se várias decisões durante a conceção desta aplicação, sendo que algumas levaram a que a situação simulada fosse diferente da realidade. Isto deveu-se à simplificação de alguns processos, de problemas encontrados e limitações inerentes ao MATPOWER.

4.1.1 Considerações efetuadas devido ao *software*

Como já foi referido anteriormente na secção 3.2 do capítulo 3, o MATPOWER apresenta-se como um *software* limitado no que diz respeito às simulações de trânsito de potências. Isto implica que a aplicação possua algumas limitações, sendo que, uma delas, é que não podem ser inseridos dois geradores nos mesmos barramentos, ou seja, o valor equivalente deste tem que

ser calculado de forma a traduzir-se num só gerador. Isto deve-se ao facto de a identificação de cada gerador no MATPOWER ser feita através do barramento em que esta se encontra presente. O mesmo ocorre para as linhas de transmissão, transformadores e cargas, pois o seu método de identificação também é feito utilizando os barramentos em que estão presentes. Isto traz algumas fraquezas à aplicação, pois estes componentes de que serão calculados equivalentes podem possuir características distintas.

Os fenómenos transitórios, relativo à tensão e à frequência não foram considerados nesta aplicação, dado que, o MATPOWER realiza um trânsito de potências bastante simples, não analisando este tipo de fenómenos gerados durante o processo de RS. Este aspeto, em particular, assume alguma importância neste trabalho, devido à estratégia de reposição utilizada, sendo que, como o esqueleto da rede é restaurado em primeiro lugar, podem existir tensões transitórias criadas que não são consideradas.

4.1.2 Considerações efetuadas na realização da aplicação

Para a realização desta aplicação foram efetuadas algumas considerações que limitam os cenários em que a ferramenta criada pode apresentar soluções. Em primeiro lugar, tal como já foi referido na secção 3.3.1, no capítulo 3, manobras realizadas durante a construção do esqueleto da rede possuem dependência entre si, e, devido a isso, só foi possível utilizar uma meta-heurística para apoiar a identificações dos passos do processo de reposição, na fase de reposição de cargas da RS.

Durante a codificação das manobras que traduzem um incremento nas cargas da rede, foi decidido que os números que representam os valores de carga ativa e reativa seriam inteiros, pelo que não é possível executar incrementos de cargas cujo valor de carga ativa ou reativa sejam decimais. Para o valor que representa a carga ativa assim se decidiu, pois, caso esse número fosse decimal, este modificaria o valor da carga reativa nessa manobra. Isto deve-se ao facto de que estes valores possuem diferentes Algarismos que podem ocupar, tal como foi explicado na secção 3.3.2.1.4 no capítulo 3. Pelo que, se fosse tentado um incremento com um número decimal de potência ativa, durante a codificação deste incremento, este número faria interferência com a codificação da potência reativa.

A estratégia de reposição utilizada nesta aplicação foi do tipo *top-down*, no entanto, esta aplicação não é capaz de realizar planos de RS que sejam executados utilizando ilhas elétricas. Ou seja, a aplicação só é capaz de realizar planos de RS em redes em que exista somente um gerador com capacidade de *black-start*. Esta faceta desta ferramenta debilita-a bastante, pois afasta-a de um cenário real. Essa possibilidade não foi implementada na aplicação devido à sua complexidade.

Sendo os planos de RS elaborados constituídos por diversas manobras, foi considerado que, entre cada uma, o controlo secundário do SEE entra em ação, fazendo com que os valores da frequência e tensão da rede voltem aos valores nominais.

As diferentes manobras presentes nos planos de RS criados, utilizando os dois casos, A e B, têm em conta os tempos mínimos necessários à execução de cada ação. Ou seja, nas diversas

operações realizadas na rede, é necessário respeitar um tempo mínimo de atuação que corresponde a manobras realizadas pelo operador da rede.

Por norma, as unidades de produção do tipo térmico possuem um tempo de arranque bastante considerável. De facto, neste tipo de unidades, ele pode demorar entre uma a seis horas, no melhor dos casos, ou seja, é necessário ter em conta que se trata de uma inicialização a quente (*hot restart*) e que a unidade térmica em questão possui características de arranque rápido. [5].

Neste trabalho, considerou-se um tempo de arranque mínimo para as unidades de geração. Esta opção foi tomada de forma a simplificar o problema, no entanto, procedeu-se, na mesma, à avaliação do impacto dos tempos de arranque dos geradores, no processo de RS. Deste modo, é possível observar mais facilmente, nos gráficos gerados pela aplicação, os dados respetivos aos limites avaliados em cada caso. Se fossem utilizados os tempos de arranque reais, o eixo correspondente ao tempo seria maior e a percentagem do mesmo que corresponderia a manobras como, por exemplo, a energização de linhas ou transformadores seria ínfima. Esta decisão também foi tomada para que se pudesse realizar uma melhor comparação entre o caso A e B. Isto deve-se ao facto de, quando o sistema se encontra num estado em que está à espera do arranque de um gerador e não pode energizar nenhuma linha, transformador, ou inicializar outro gerador, ele incrementa carga, se tal for possível, de acordo com os limites de frequência e capacidade de produção presente no sistema. Se os tempos de arranque fossem iguais aos reais, e o sistema se encontrasse no estado descrito anteriormente, ele incrementaria um nível elevado de carga ou até mesmo toda a carga do sistema durante a etapa do reestabelecimento do serviço do esqueleto. Se isso acontecesse, a tarefa de registar as diferenças entre os casos A e B tornar-se-ia mais difícil ou até mesmo impossível.

Os tempos mínimos definidos entre as diversas manobras do sistema foram os seguintes [5]:

- Manobras na rede – 40 segundos;
- Inicialização de unidades de geração hídrica – 2 minutos;
- Inicialização de unidades de geração térmica – 8 minutos.¹

Tal como já foi referido na secção 3.3.4 do capítulo 3, a meta-heurística escolhida na conceção do caso B foi o PSO. Tendo em conta o problema em questão e as diferentes metodologias mencionadas no capítulo 2, procurou-se escolher o método que melhor se adaptaria ao problema. Foram utilizadas metodologias como a programação evolucionária e estratégias da evolução. No entanto, o PSO revelou apresentar os melhores resultados. O problema é o de maximização da carga que é incrementada no sistema em cada passo do plano de RS. Considerou-se que cada diferente plano de RS é um indivíduo constituído por diferentes passos. Tendo isto em conta, a opção que se melhor enquadra neste problema é uma meta-heurística de enxame de partículas, ou seja, considera-se que uma sequência de manobras (plano de RS) é um enxame (indivíduo) e que cada manobra é uma partícula.

¹Este tempo de arranque é muito reduzido comparando com o tempo de arranque real deste tipo de unidades. Esta decisão foi tomada para que fosse mais fácil analisar os planos de RS gerados

Durante este trabalho, considerou-se que, nas simulações realizadas, a modelização adaptada para as cargas do sistema e os referidos incrementos de potências podem ser extrapolados para a realidade. Desta forma, considera-se que podem ser feitos incrementos de carga num barramento que se traduzam na energização de uma percentagem de consumidores ligados a este barramento. Teve-se também em conta que os consumidores ligados a um barramento são modelizados por uma única carga, sendo que um incremento de potência, cujo valor mínimo tomado é de 1 MW, corresponde a alimentar uma percentagem dos consumidores presentes no barramento.

Se bem que, durante a conceção dos algoritmos que constituem os caso A e B fosse tomada a precaução de garantir que estes funcionariam para qualquer rede, de acordo com as limitações do programa, não foram efetuados testes noutras redes sem ser a que foi apresentada (B).

4.1.3 Considerações utilizadas para os parâmetros do SEE

Durante todo o processo de RS, os limites técnicos e regulamentares impostos devem ser respeitados. Uma falha na manutenção destes limites pode provocar graves consequências ao SEE, podendo mesmo levar à ocorrência de uma nova queda do mesmo. Nos SEE reais, quando estes limites operacionais são violados, existem proteções que entram em ação, prevenindo assim potenciais complicações. Todavia, como os planos de RS elaborados, através da aplicação criada, analisam cuidadosamente os limites, durante todo o processo, de forma nunca serem ultrapassados, não foram projetadas proteções na conceção da aplicação.

Os limites considerados, no que diz respeito às variações admissíveis das variáveis do sistema durante todo o processo de RS utilizados para a criação desta aplicação foram os seguintes:

- Frequência – [49.8,50.2] Hz;
- Tensão – [0.95,1.1] p.u..

Estes foram os valores escolhidos para a criação das simulações que permitem elaborar planos de RS, no entanto, estes podem ser modificados pelo utilizador de acordo com as suas preferências.

Nos instantes iniciais do processo de RS, o balanço de energia reativa é o principal problema a considerar. Isto deve-se à energização das linhas de grande dimensão e à capacidade limitada de absorção de energia reativa dos geradores elétricos operacionais. Logo, os incrementos de potência nas cargas devem ser realizados respeitando uma $\tan(\phi)$ considerável. Assim, os incrementos de carga realizados durante todo o processo de RS, nesta aplicação, foram concebidos respeitando uma $\tan(\phi)$ de 0,4, sendo este o valor máximo que pode tomar o rácio entre a potência reativa e ativa realizado num incremento. Este valor pode ser modificado pelo utilizador de acordo com as suas preferências.

4.2 Análise do Caso A

Neste caso de estudo, foi utilizado um método de decisão empírico, na fase de incremento de cargas. De seguida, cada passo de um exemplo de um plano criado por este caso é explicado detalhadamente, aliado às consequências originadas pelo mesmo.

4.2.1 Reestabelecimento do serviço do esqueleto da rede

Nesta secção, é analisada com detalhe um exemplo de um plano de RS que diz respeito ao reestabelecimento do serviço do esqueleto da rede criado pelo caso A.

Tabela 4.1: Plano de RS para o reestabelecimento do serviço do esqueleto da rede criado através do caso A

Tempo(s)	Manobra	Tempo(s)	Manobra
40	Energização do transformador 3-1	560	Fecho da linha 12-14
80	Inicialização do Gen1	560	Entrada em serviço do Gen1
120	Fecho da linha 3-6	600	Energização do transformador 15-14
160	Energização do transformador 7-6	640	Fecho da linha 3-4
200	Inicialização do Gen7	680	Energização do transformador 5-4
240	Aumento de potência na carga 7	720	Aumento de potência na carga 7
280	Aumento de potência na carga 7	760	Fecho da linha 10-17
320	Aumento de potência na carga 7	800	Energização do transformador 11-10
320	Entrada em serviço do Gen7	840	Aumento de potência na carga 11
360	Fecho da linha 6-17	880	Fecho da linha 17-19
400	Energização do transformador 17-16	920	Energização do transformador 18-19
440	Inicialização do Gen16	920	Entrada em serviço do Gen16
480	Fecho da linha 12-17	960	Fecho da linha 6-8
520	Energização do transformador 13-12	1000	Energização do transformador 9-8

Na tabela 4.1, é possível observar a sequência de manobras que constituem o plano de RS para o reestabelecimento do serviço do esqueleto gerado pelo caso A. A informação é apresentada de acordo com a codificação explicada no capítulo 3, na secção 3.3.2.1, sendo que cada manobra é apresentada com o tempo em que esta ocorre.

Este plano, presente na tabela 4.1, irá restaurar todos os componentes do esqueleto da rede, menos aqueles que estejam em serviço. Neste caso, o gerador 2 possui capacidade de *black-start* e o transformador que vai do barramento 3 ao 2 encontra-se energizado. Estes componentes não farão parte deste plano.

Na figura 4.1, é possível observar evolução da variação sofrida pela frequência ao longo do processo de RS. Seguidamente, é explicada detalhadamente cada ação que provocou uma variação de frequência na rede.

A primeira manobra a mencionar consiste na energização do transformador que vai do barramento três ao um, energizando, assim, o barramento em que o gerador um se encontra. Desta forma, é possível que esta máquina térmica seja inicializada, sendo que demorará oito minutos até que se encontre operacional. Também a inicialização do gerador 7 é executada no instante $t=200$ s. Como este é do tipo hídrico encontrar-se-á operacional passados dois minutos. De seguida, verifica-se que ocorre uma variação de frequência aos 240 segundos. Este incremento consistiu num aumento de 6 MW e 2 Mvar no barramento 7. São realizados ainda mais dois incrementos nos instantes $t=280$ s e $t=320$ s. Estes incrementos foram realizados pois o sistema encontra-se num estado de espera até que o gerador 1 ou o 7 se encontre operacional. Este estado de espera

ocorre dado que o sistema de transmissão de alta tensão gera grandes quantidades de energia reativa. Isto deve-se ao facto do comprimento das linhas ser considerável, variando entre 50 km e 150 km (tabela 3.1, capítulo 3).

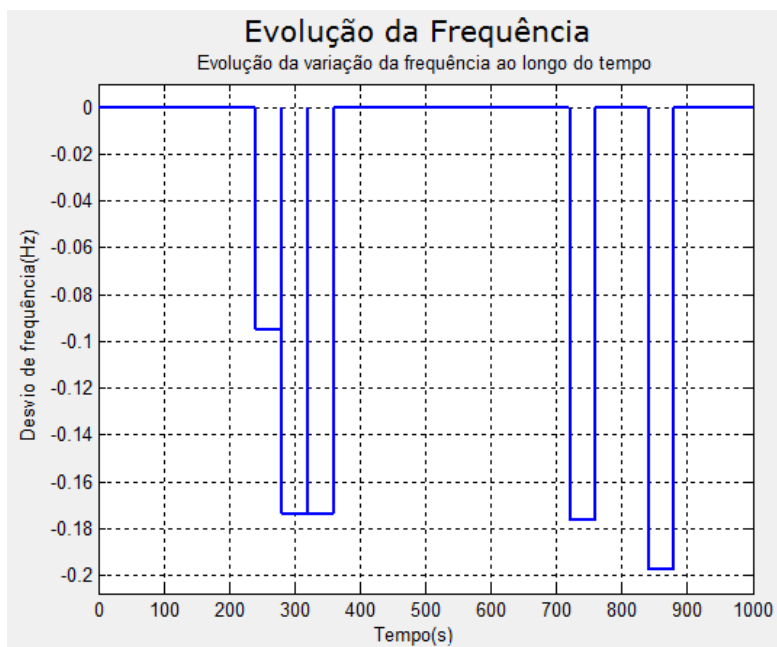


Figura 4.1: Evolução da variação de frequência no sistema ao longo do tempo

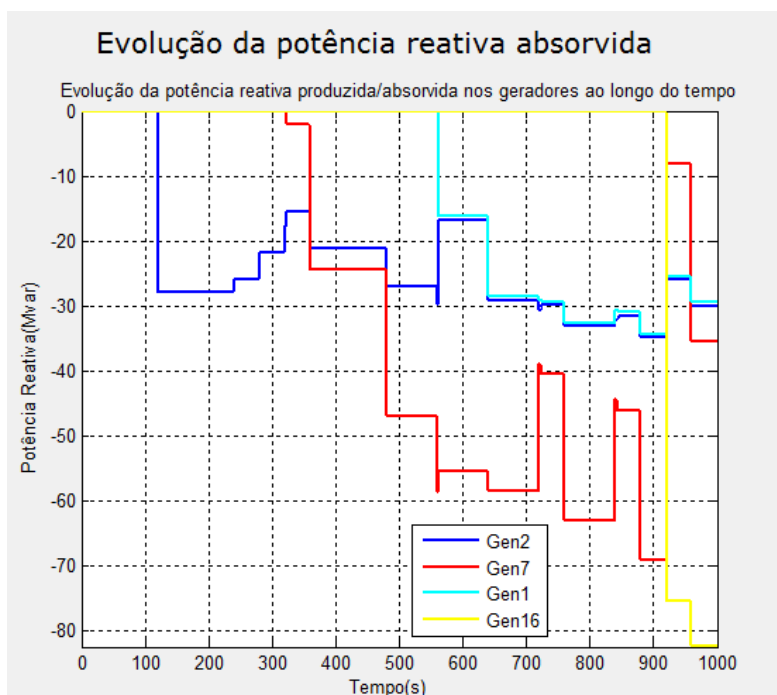


Figura 4.2: Evolução da absorção máxima de potência reativa nos vários geradores ao longo do tempo

A evolução da absorção máxima de potência reativa nos vários geradores ao longo do tempo pode ser observada na figura 4.2. É possível observar o impacto da energização de uma linha de transmissão de alta tensão na rede, no instante $t=120$ s. Pode analisar-se que só através de energização de uma linha, o valor da absorção de potência reativa do gerador 2 aumenta consideravelmente. Consequentemente, não pode ser energizada outra linha no sistema enquanto não forem realizados incrementos de carga ou caso outro gerador entre em serviço. Por esta razão, tal como foi explicado anteriormente, como não é possível que um gerador entre em serviço no instante $t=240$ s, realizam-se incrementos de carga. Como estes incrementam potência reativa, é possível observar uma diminuição no valor de absorção de potência reativa por parte do gerador 2. Em teoria, o consumo de energia reativa necessário, numa determinada fase do processo de RS, em que as unidades de produção se encontram nos limites de absorção de potência reativa, pode ser realizado ao executar incrementos de potência reativa num determinado barramento. No entanto, com estes incrementos de potência reativa, estariam associados incrementos de potência ativa, sendo que estes seriam cerca de 2,5 vezes maiores que os de potência reativa. Estes incrementos de energia ativa provocariam variações na frequência do sistema que poderiam mesmo violar os limites de frequência da rede. Por este motivo, o uso destes incrementos, neste tipo de situações, é limitado. Por norma, estando poucas unidades de produção operacionais, os incrementos deverão tomar valores reduzidos.

No instante $t=320$ s, o gerador 7 entra em serviço, tornando-se de novo possível proceder ao reestabelecimento do serviço do esqueleto. Isto deve-se ao facto de que, ao ligar este gerador, a capacidade de absorção de energia reativa do sistema é maior, tornando-se possível energizar novas linhas. Com esse objetivo, no instante $t=360$ s, a linha entre os barramentos 6 e 17 é energizada, verificando-se de novo um novo aumento nos valores de absorção de potência reativa dos geradores operacionais.

No instante $t=400$ s, o transformador entre os barramentos 17 e 16 é energizado. Com esta ação, o gerador 16 pode agora ser inicializado. Esta manobra é realizada no instante $t=440$ s. Neste momento, a primeira prioridade estabelecida é cumprida (3.3.2, capítulo 3), ou seja, todas as unidades de produção encontram-se operacionais ou em inicialização. O principal objetivo agora é a energização de linhas e transformadores.

O processo de reestabelecimento do serviço do esqueleto da rede continua com a energização da linha entre os barramento 12 e 17, no instante $t=480$ s. De novo, é possível observar, na figura 4.2, um aumento dos valores de absorção de potência reativa nos geradores operacionais. No instante $t=520$ s, o transformador entre os barramentos 13 e 12 é energizado. Seguidamente, procede-se à energização de outra linha de transmissão no instante $t=560$ s. Esta encontra-se entre os barramentos 12 e 14. Neste mesmo instante, a unidade de produção térmica presente no barramento 1 entra em serviço, pois o tempo necessário ao arranque da mesma já foi completado. Dado que este gerador se encontra operacional, é possível verificar, na figura 4.2, que este toma parte da carga capacitiva presente na rede, levando, assim, a uma diminuição no valor de absorção de potência reativa nos outros geradores operacionais. Depois, nos instante $t=600$ s e $t=640$ s são energizados o transformador, entre os barramentos 15 e 14, e uma linha de transmissão, entre os

barramentos 3 e 4, respetivamente. No instante $t=680$ s, o transformador entre os barramentos 5 e 4 é energizado.

No instante $t=720$ s, é realizado um incremento de carga de 41 MW e 16 Mvar no barramento 7. Este provoca uma variação de frequência no sistema, tal como é possível observar na figura 4.1. Na sequência desta manobra, é possível verificar também, ainda na figura 4.1, que o controlo secundário do SEE entra em ação, voltando, assim, a frequência ao seu valor nominal (50 Hz). Esta ação também provoca uma diminuição no valor de absorção de potência reativa do gerador 7, sendo que os valores de absorção de potência reativa das outras máquinas em serviço permanecem inalterados. Isto deve-se à localização do incremento, como este é feito no barramento 7, parte da potência reativa que estava a ser absorvida pelo gerador 7 passará agora para a carga em questão.

Os planos concebidos neste caso também geram informação sobre os incrementos de potência a realizar em cada gerador. No entanto, devido à quantidade de manobras relativas a este tipo de ações presentes em cada plano foi decidido que estas não seriam mencionadas na tabela 4.1, de forma a que esta seja mais fácil de analisar. Um exemplo deste tipo de manobra está presente na tabela 4.2. Nesta tabela é possível observar que o incremento de potência realizado é repartido pelos geradores operacionais.

Tabela 4.2: Plano de RS para o reestabelecimento do serviço do esqueleto da rede criado através do caso A

Tempo(s)	Manobra
720	Incremento de 41 MW e 16 Mvar na carga 7
720	Incremento na produção do gerador 2 de 11.14 MW
720	Incremento na produção do gerador 2 de 4.35 Mvar
720	Incremento na produção do gerador 7 de 16.33 MW
720	Incremento na produção do gerador 7 de 6.37 Mvar
720	Incremento na produção do gerador 1 de 13.54 MW
720	Incremento na produção do gerador 1 de 5.28 Mvar

De seguida, no instante $t=760$ s, é energizada outra linha de transmissão entre os barramentos 10 e 17. De novo, é possível registar um aumento nos valores de absorção de potência reativa de todos os geradores, tal como era esperado. No instante $t=800$ s, é energizado o transformador entre os barramentos 11 e 10, mas esta manobra não provoca qualquer alteração significativa no sistema. No instante $t=840$ s, executa-se outro incremento de cargas. Este provoca de novo uma variação no valor de frequência do sistema e uma diminuição nos valores de absorção de potência reativa de todos os geradores. Este também provoca um aumento da produção nos vários geradores, o que pode ser observado na figura 4.3.

No instante $t=880$ s, é energizada a linha de transmissão entre os barramentos 18 e 19. As alterações verificadas já eram esperadas. Posteriormente, no instante $t=920$ s, o transformador entre os barramentos 18 e 19 é energizado. Neste mesmo instante, o gerador 16 entra em serviço. Por este motivo ocorre uma grande variação nos valores absorção de potência reativa de todos os geradores. Isto acontece porque o gerador 16 possui o maior valor de potência nominal e de

absorção máxima de potência reativa, ficando, assim, este gerador responsável por absorver uma parte significativa da potência reativa presente no sistema.

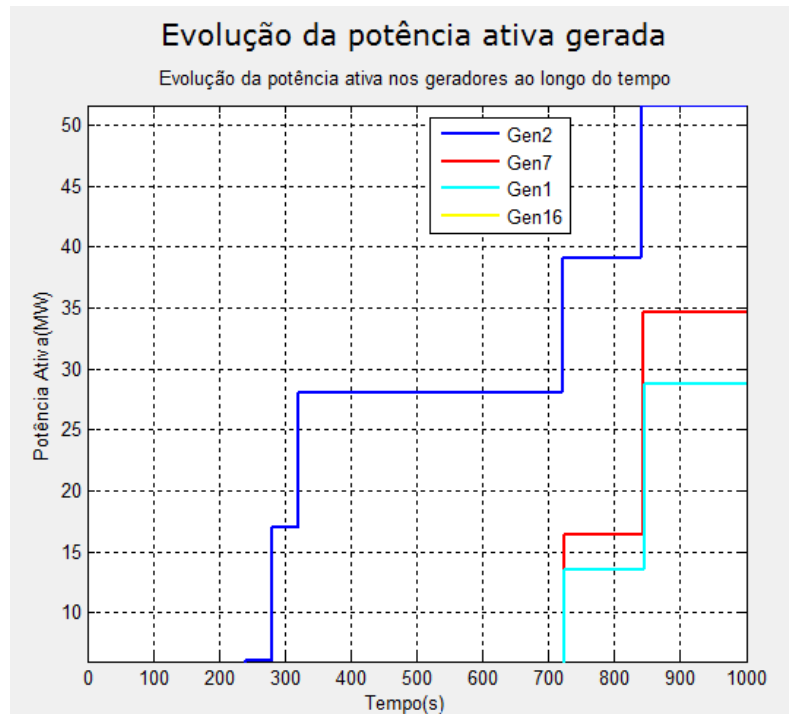


Figura 4.3: Evolução da produção de potência ativa nos vários geradores ao longo do tempo

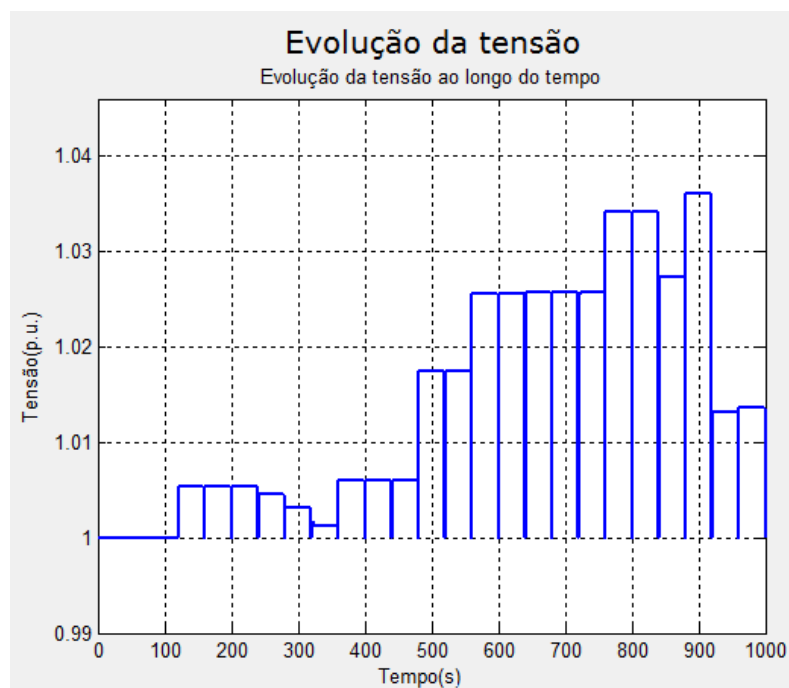


Figura 4.4: Evolução da tensão máxima da rede ao longo do tempo

Na figura 4.4, é possível observar a evolução da tensão máxima da rede ao longo do tempo. A tensão varia de acordo com a quantidade e o trânsito de potência reativa na rede. Considerou-se que, no final de cada manobra, os valores da tensão dos barramento voltariam ao nominal, ou seja, a 1 p.u.. No instante $t=880$ s, é quando se verifica uma maior variação no valor máximo da tensão da rede. Isto deve-se à entrada em serviço do gerador 16. Como este apresenta um valor alto de potência nominal, tal como a sua capacidade máxima de absorção de potência reativa, a potência reativa que irá absorver provocará um menor trânsito de potência reativa na rede, levando a uma diminuição nos níveis de tensão. É também possível analisar na figura 4.4 que os limites de tensão definidos (4.1.3) nunca são violados.

Nos instantes $t=960$ s e $t=1000$ s, são energizados a linha de transmissão, entre os barramentos 6 e 8, e o transformador, entre os barramentos 9 e 8. Desta forma, o esqueleto da rede encontra-se totalmente restaurado, sendo possível proceder à próxima etapa, o incremento de cargas.

4.2.2 Incremento de Cargas

Nesta secção, é analisada com detalhe um exemplo de um plano de RS que diz respeito ao reposição de cargas da rede criado pelo caso A, sendo que este pode ser analisado na tabela 4.3. A rede em que este plano irá incidir tem um estado igual ao estado em que a rede ficou após concluir a etapa de reestabelecimento do serviço do esqueleto. Ou seja, esta apresenta todos os transformadores e linhas de transmissão energizadas e todas as unidades de produção inicializadas. Esta também apresenta alguma carga já incrementada.

Tabela 4.3: Plano de RS para a reposição de cargas da rede criado através do caso A

Tempo(s)	Incremento	Tempo(s)	Incremento
1040	71 MW e 28 Mvar na carga 13	1240	11 MW e 4 Mvar na carga 15
1080	71 MW e 28 Mvar na carga 16	1280	71 MW e 28 Mvar na carga 18
1120	71 MW e 28 Mvar na carga 9	1320	21 MW e 4 Mvar na carga 7
1160	71 MW e 28 Mvar na carga 5	1320	19 MW e 2 Mvar na carga 16
1200	19 MW e 2 Mvar na carga 5	1320	19 MW e 2 Mvar na carga 18
1200	56 MW e 22 Mvar na carga 15	1320	3 MW e 1 Mvar na carga 15
1240	19 MW e 2 Mvar na carga 13	1360	20 MW e 3 Mvar na carga 15
1240	44 MW e 12 Mvar na carga 11	1360	19 MW e 2 Mvar na carga 9

A primeira manobra realizada por este plano é o incremento de carga de 71 MW e 28 Mvar no barramento 13 no instante $t=1040$ s. Este incremento gera uma variação de frequência, tal como se pode observa na figura 4.5. Esta figura mostra a evolução da variação de frequência no sistema ao longo do tempo neste plano. A figura mostra ainda que os incrementos de carga realizados durante todo o processo procuram tomar o valor mais alto possível, de forma a minimizar o tempo de reposição de cargas. No entanto, estes nunca ultrapassam o limite definido pelo utilizador, que neste caso não permite incrementos de carga que provoquem uma variação de frequência superior a 0.2 (4.1.3).

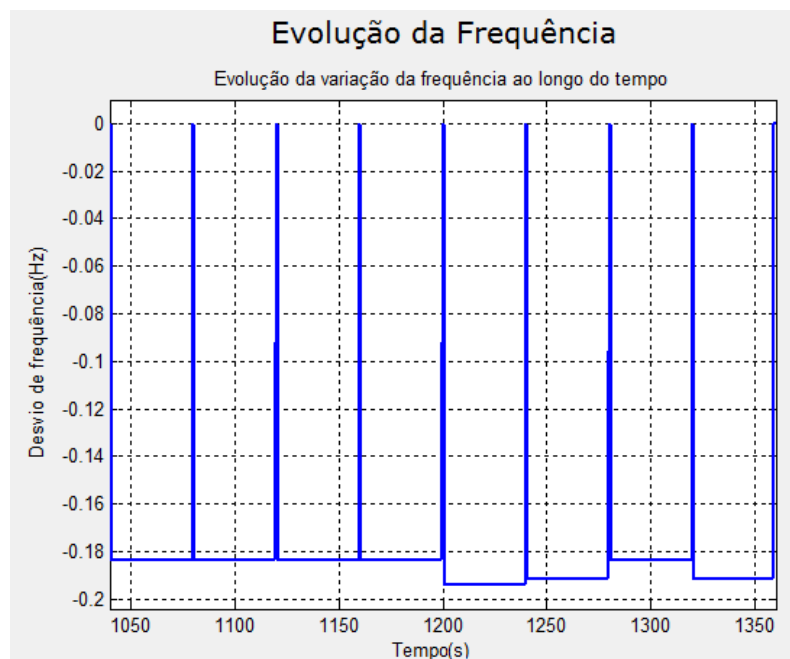


Figura 4.5: Evolução da variação de frequência no sistema no sistema ao longo do tempo

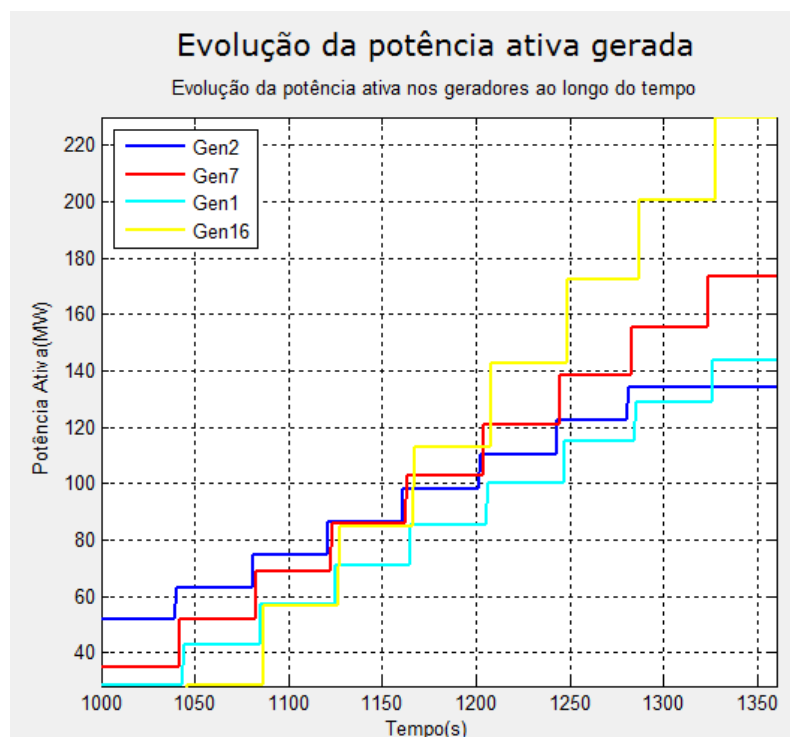


Figura 4.6: Evolução da produção de potência ativa nos vários geradores ao longo do tempo

De seguida procede-se à execução da seguinte manobra, sendo que esta incrementa 71 MW e 28 Mvar no barramento 16 no instante $t=1080$ s. É possível observar a repartição realizada pelos geradores deste incremento na figura, 4.6. Esta mostra a evolução da produção de potência ativa

nos vários geradores ao longo do tempo. Neste caso, todos os geradores se encontram em serviço e os seus limites de produção ainda não foram atingidos, pelo que a carga será repartida pelos quatro geradores em serviço de acordo com o seu estatismo.

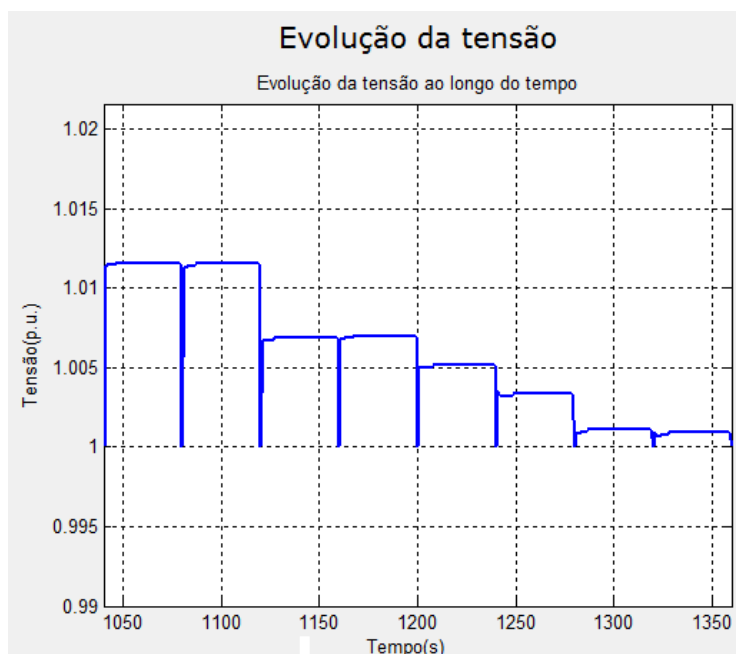


Figura 4.7: Evolução da tensão máxima da rede ao longo do tempo

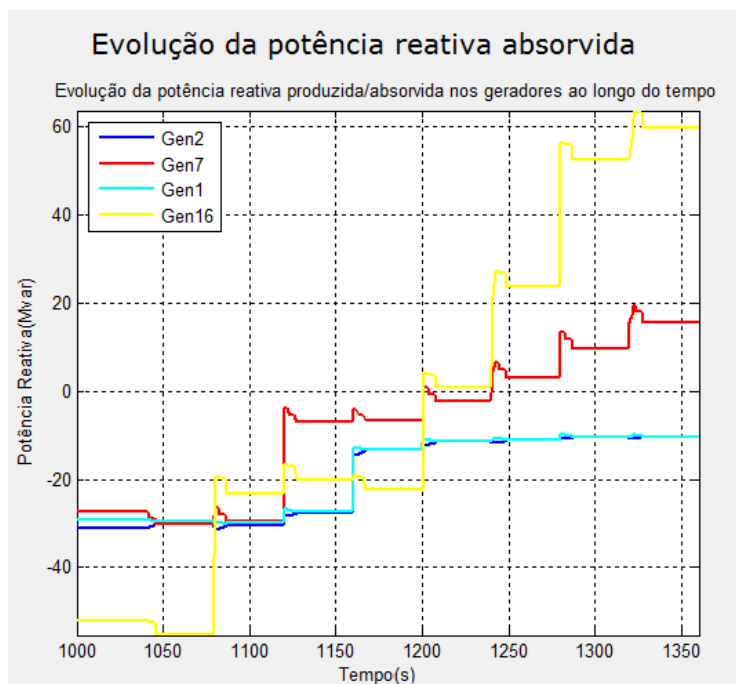


Figura 4.8: Evolução da absorção máxima de potência reativa nos vários geradores ao longo do tempo

O processo prossegue e as alterações registadas continuam a ser variações de frequência e um incremento na produção dos geradores em serviço. Até que no instante $t=1320$ s, quando são realizados incrementos de carga nos barramentos 7, 16, 18 e 15, o gerador 2 atinge o seu limite de produção, e, devido a isso, este não entrará mais na repartição de carga realizada pelos geradores. Esta repartição será agora realizada pelos três geradores que ainda se encontram em serviço. A partir desse momento, o processo prossegue sem que existam manobras cujas consequências valha a pena discutir.

Na figura 4.7, é possível observar a evolução da tensão máxima da rede ao longo do tempo. Da observação da figura conclui-se que a tensão máxima da rede diminui à medida que se incrementa carga, isto deve-se à diminuição de trânsito e quantidade de potência reativa na rede.

Na figura 4.8, verifica-se que, durante o processo de reposição de cargas, os geradores 7 e 16 deixam de absorver potência reativa e começam a produzi-la. Isto ocorre porque a potência reativa gerada pelas linhas deixa de ser suficiente para satisfazer a necessidade de potência reativa na rede. Os geradores 1 e 2 continuam a absorver potência reativa, embora a quantidade absorvida seja pequena.

4.3 Análise do Caso B

Neste caso de estudo foi utilizado o mesmo método para realizar o reestabelecimento do serviço do esqueleto da rede. No entanto, durante a fase de incremento de cargas, foi utilizada uma meta-heurística do tipo PSO para apoiar a identificação dos passos do processo de reposição. Cada passo de um exemplo de um plano criado por este caso é explicado, em seguida, relacionando-o com as consequências originadas pelo mesmo.

4.3.1 Reestabelecimento do serviço do esqueleto da rede

O plano gerado para efetuar o reestabelecimento do serviço do esqueleto da rede, por este caso B, pode ser observado na tabela 4.4. O método usado foi o mesmo que o utilizado no caso A, pelo que o detalhe com que este plano será, agora, analisado será menor do que o detalhe na análise do plano para reestabelecimento do serviço do esqueleto gerado pelo caso A.

O processo de reestabelecimento do serviço do esqueleto da rede, presente na tabela 4.4, é iniciado com a energização do transformador entre os barramentos 1 e 3. Agora é possível dar a ordem para o gerador 1 ser inicializado, sendo essa manobra realizada no instante $t=80$ s. A linha de transmissão entre os barramentos 3 e 6 e o transformador entre os barramentos 7 e 6 são energizados nos instantes $t=120$ s e $t=160$ s, respetivamente. A inicialização do gerador 7 é realizada no instante $t=200$ s.

No instante $t=240$ s, o sistema encontra-se no mesmo estado de espera descrito anteriormente (4.2.1). Neste estado, o valor de absorção de potência reativa do gerador operacional, que neste caso é o 2, já se encontra próximo do seu limite, tal como pode ser observado na figura 4.9, pelo que a energização de uma linha de transmissão resultaria na violação desse limite. Devido a isso,

é incrementada carga até que outro gerador fique operacional e seja possível prosseguir com o reestabelecimento do serviço do esqueleto.

Tabela 4.4: Plano de RS para o reestabelecimento do serviço do esqueleto da rede criado através do caso B

Tempo(s)	Manobra	Tempo(s)	Manobra
40	Energização do transformador 3-1	560	Entrada em serviço do Gen1
80	Inicialização do Gen1	600	Energização do transformador 13-12
120	Fecho da linha 3-6	640	Fecho da linha 3-4
160	Energização do transformador 7-6	680	Energização do transformador 5-4
200	Inicialização do Gen7	720	Aumento de potência na carga 5
240	Aumento de potência na carga 7	760	Aumento de potência na carga 16
280	Aumento de potência na carga 7	800	Fecho da linha 12-14
320	Aumento de potência na carga 7	840	Energização do transformador 15-14
320	Entrada em serviço do Gen7	880	Aumento de potência na carga 18
360	Fecho da linha 6-17	920	Fecho da linha 10-17
400	Energização do transformador 17-16	920	Entrada em serviço do Gen16
440	Inicialização do Gen16	960	Energização do transformador 11-10
480	Fecho da linha 17-19	1000	Fecho da linha 6-9
520	Energização do transformador 18-19	1040	Energização do transformador 9-8
560	Fecho da linha 12-17		

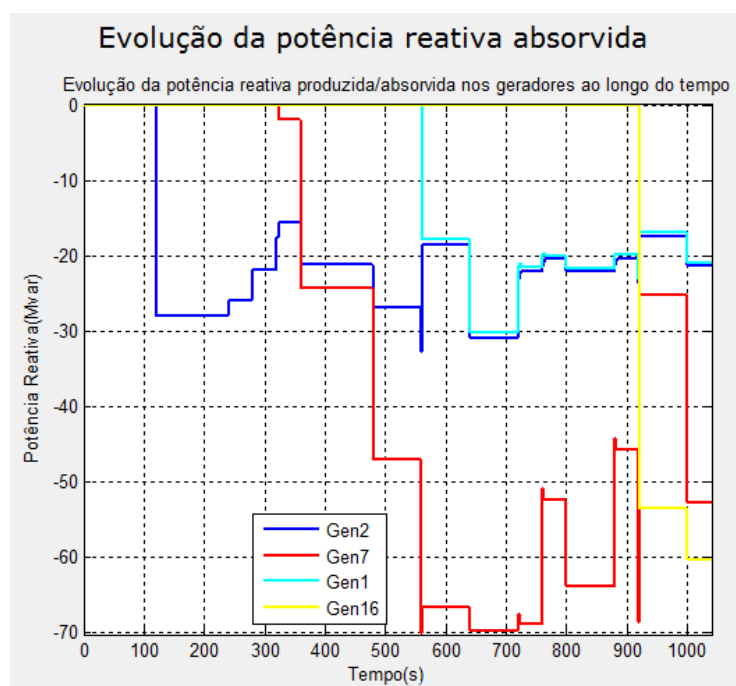


Figura 4.9: Evolução da absorção/produção de potência reativa nos vários geradores ao longo do tempo

No instante $t=320$ s, o gerador 7 entra em serviço, pelo que é possível continuar com o reestabelecimento do serviço do esqueleto da rede. A linha de transmissão entre os barramentos 6 e

17 é energizada no instante $t=360$ s, tal como o transformador entre os barramentos 17 e 16, no instante $t=400$ s.

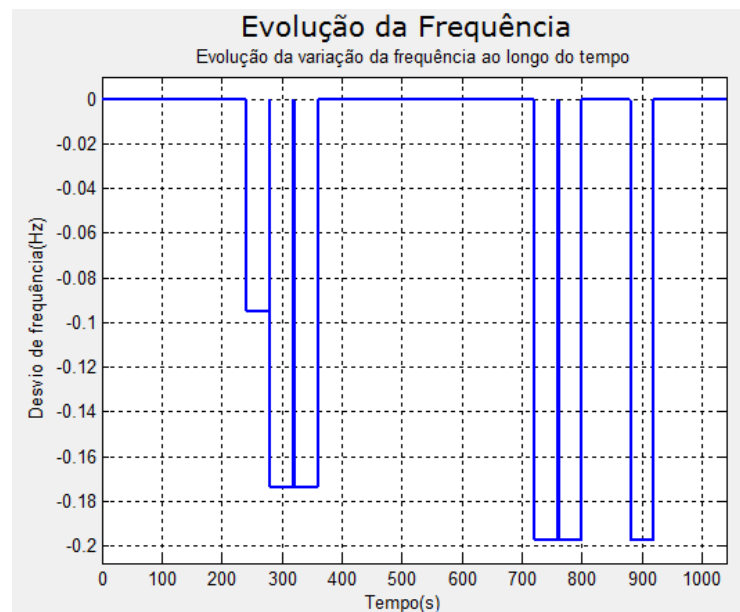


Figura 4.10: Evolução da variação de frequência no sistema ao longo do tempo

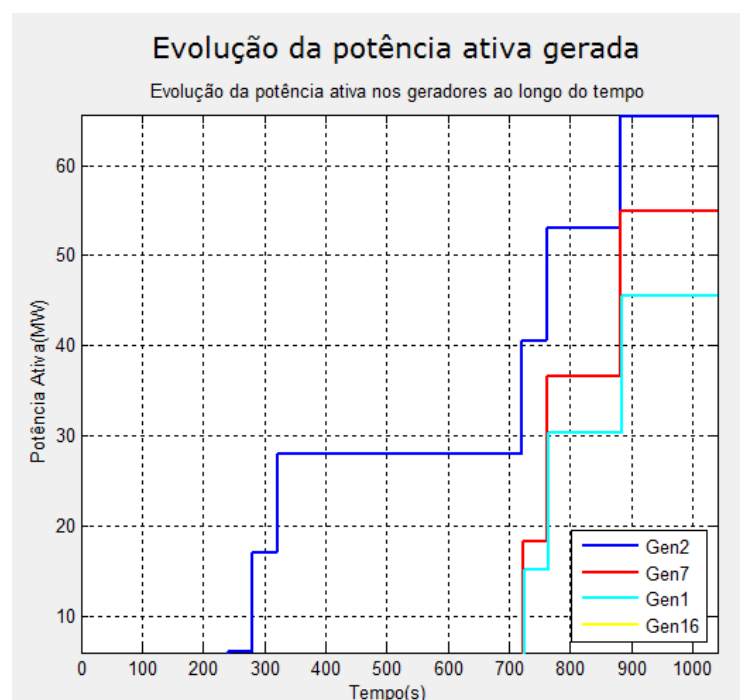


Figura 4.11: Evolução da produção de potência ativa nos vários geradores ao longo do tempo

No instante $t=440$ s, é dada a ordem para o gerador 16 inicializar, sendo que, neste momento todos os geradores se encontram ou a inicializar ou já operacionais. De seguida, as linhas de transmissão entre os barramentos 17 e 19 e entre os barramentos 12 e 17 são energizadas, sendo

energizado também o transformador entre os barramentos 18 e 19. No instante $t=560$ s, o gerador 1 entra em serviço. Nas seguintes manobras, os transformadores entre os barramentos 13 e 12 e 5 e 4 são energizados, tal como a linha entre os barramentos 3 e 4.

No instante $t=720$ s, o sistema encontra-se de novo num estado de espera em que não podem ser energizadas linhas de transmissão. São então efetuados incrementos de carga. Estes provocam variações na frequência no sistema, tal como pode ser observado na figura 4.10.

Com o incremento de potência realizado nos instantes $t=720$ s e $t=760$ s, o sistema saiu do estado de espera, devido à carga reativa incrementada. Posto isto, procedeu-se à energização da linha de transmissão entre os barramentos 12 e 14 e à energização do transformador entre os barramentos 15 e 14. Após a realização destas manobras o sistema encontra-se de novo num estado de espera no instante $t=880$ s. Por este motivo é de novo realizado um incremento de potência no instante $t=880$ s. A repartição desse incremento de potência pelos diversos geradores em serviço pode ser observada na figura 4.11.

Devido ao incremento de potência executado no instante $t=880$ s o sistema saiu outra vez do estado de espera, sendo energizada a linha de transmissão entre os barramentos 10 e 17. Por fim, no instante $t=920$ s, o gerador 16 entra em serviço, estando agora todos os geradores da rede operacionais. O reestabelecimento do serviço do esqueleto continua até este estar totalmente restaurado.

Na figura 4.12, é possível analisar a evolução da tensão máxima da rede ao longo do tempo. O valor máximo verificado na figura é ligeiramente menor do que o valor registado durante a construção do esqueleto no caso A (4.4). Isto deve-se ao número superior de potência reativa incrementada durante o plano gerado por este caso, diminuindo assim o trânsito de potência reativa no sistema.

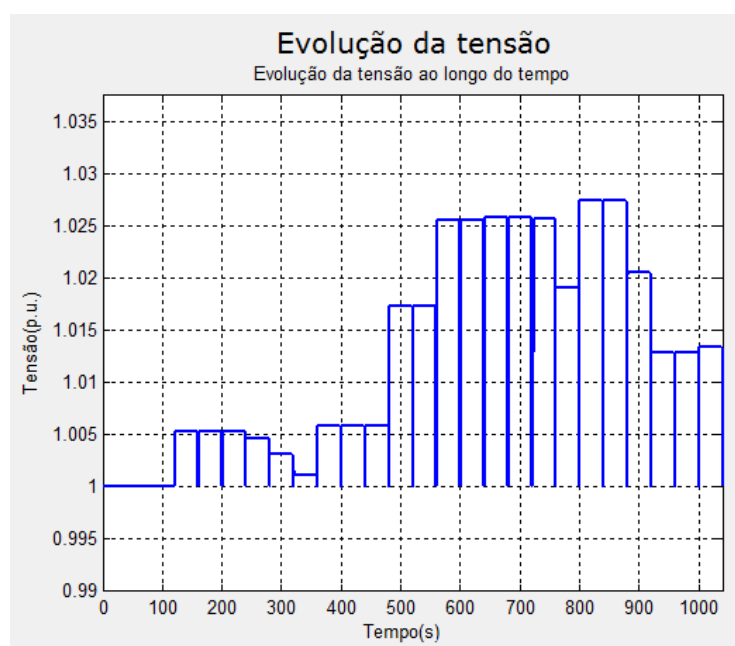


Figura 4.12: Evolução da tensão máxima da rede ao longo do tempo

4.3.2 Incremento de Cargas

Nesta secção, é analisada com detalhe um exemplo de um plano de RS que diz respeito ao reposição de cargas da rede criado pelo caso B, podendo este ser analisado na tabela 4.5. Em semelhança com o caso A, o estado da rede em que este plano irá incidir é igual ao estado em que a rede ficou, após concluir a etapa de reestabelecimento do serviço do esqueleto. Ou seja, esta apresenta todos os transformadores e linhas de transmissão energizadas, e todas as unidades de produção inicializadas. Esta também apresenta alguma carga já incrementada.

Este plano utilizou uma meta-heurística do tipo PSO para decidir a quantidade de potência ativa e reativa que seria incrementada em cada passo do plano de RS. Durante a sua análise será feita uma comparação com o plano para a reposição de cargas gerado pelo caso A.

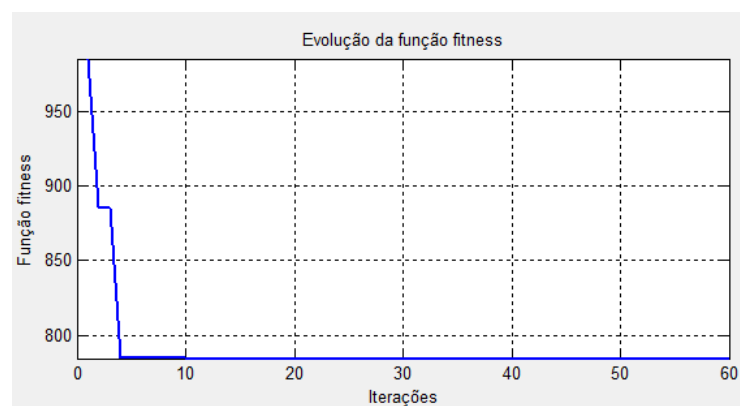


Figura 4.13: Evolução da função *fitness* ao longo das iterações realizadas

Para a conceção deste plano foi utilizada uma população inicial de 200 indivíduos e 10 gerações. Um indivíduo corresponde a um valor de potência que será incrementado num determinado passo na rede. A evolução do valor da função *fitness* ao longo das iterações realizadas pode ser observada na figura 4.13. Pela observação desta figura, é possível concluir que o PSO rapidamente encontra uma solução viável, sendo que a função *fitness* para de variar na décima geração. No entanto, de acordo com as condições estabelecidas no critério de paragem do algoritmo (3.3.4.0.12 do capítulo 3), este só parará quando a função *fitness* deixar de variar durante cinquenta iterações do mesmo.

Tabela 4.5: Plano de RS para a reposição das cargas da rede criado através do caso B

Tempo (s)	Incremento	Tempo (s)	Incremento
1080	77 MW e 30 Mvar na carga 11	1280	29 MW e 2 Mvar na carga 16
1120	77 MW e 30 Mvar na carga 13	1280	4 MW na carga 15
1160	62 MW e 20 Mvar na carga 7	1280	13 MW na carga 13
1160	15 MW e 10 Mvar na carga 16	1280	16 MW e 22 Mvar na carga 9
1200	13 MW na carga 11	1320	61 MW e 8 Mvar na carga 9
1200	54 MW e 26 Mvar na carga 15	1360	44 MW e 12 Mvar na carga 5
1240	44 MW e 12 Mvar na carga 18	1360	13 MW na carga 9
1240	32 MW e 4 Mvar na carga 15		

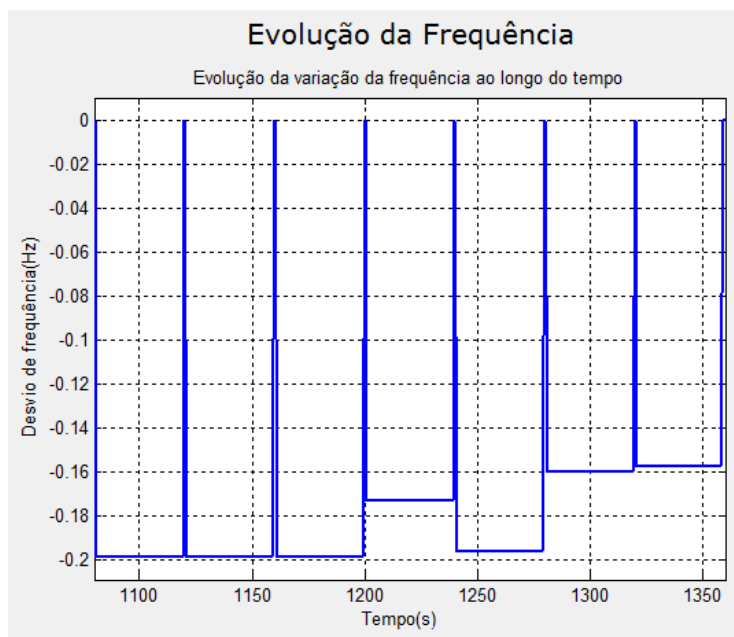


Figura 4.14: Evolução da variação de frequência no sistema ao longo do tempo

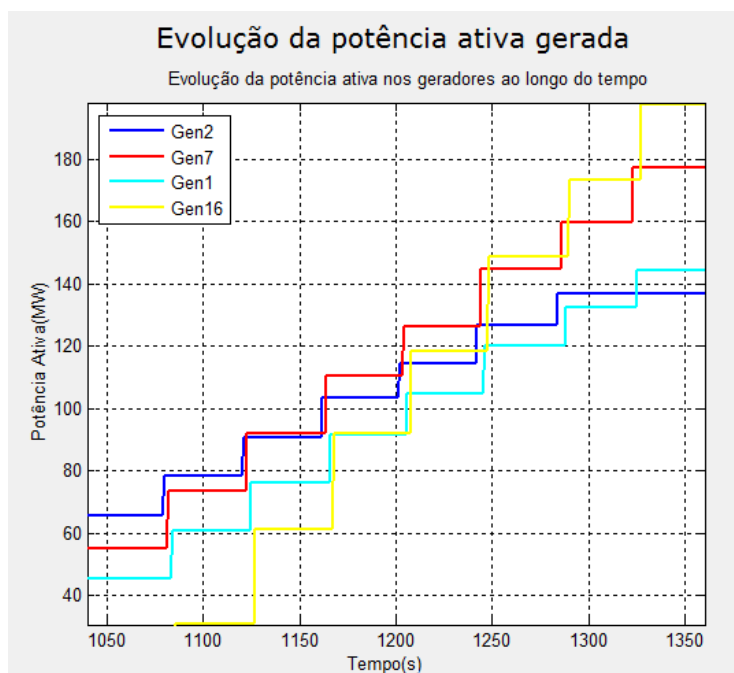


Figura 4.15: Evolução da produção de potência ativa nos vários geradores ao longo do tempo

Na tabela 4.5, pode ser observado o plano gerado por este caso para a reposição das cargas. O principal parâmetro a ser analisado é a variação de frequência ao longo do tempo, sendo este o principal indicador de que o incremento realizado num dado passo está próximo ou não do valor ideal. Os dados relativos à variação de frequência ao longo do tempo podem ser observados na figura 4.14. Pela observação da figura, é possível concluir que o plano gerado se encontra bastante

próximo de um plano ideal. Os primeiros três incrementos realizados encontram-se próximos do limite para a variação de frequência estabelecido (4.1.3). Também o quinto incremento realizado se encontra bastante próximo do limite para a variação de frequência. No entanto, os outros incrementos provocam uma variação de frequência um pouco abaixo do desejado. Esta situação ocorre, dado que a carga que foi incrementada nestes três incrementos não poderia ser incrementada em apenas dois. Por este motivo, o algoritmo reparte a carga entre os três incrementos de forma a garantir uma maior uniformidade nos valores de incrementos de potência.

Na figura 4.15 é possível observar a evolução da produção de potência ativa nos vários geradores ao longo do tempo. É de sublinhar o instante $t=1280$ s em que o gerador se encontra perto do seu limite de produção, e, por isso, deixa de entrar na repartição de potência feita pelos geradores quando existe um incremento de potência numa carga.

Na figura 4.16, é possível analisar a evolução da tensão máxima da rede ao longo do tempo. Embora este parâmetro não seja analisado no algoritmo que gera este plano de RS, ele nunca é violado. Isto acontece nesta rede em particular, quando este plano de reposição de cargas é iniciado, o sistema já se encontra com o seu esqueleto construído. Devido a isso, ao incrementar carga, os valores de tensão vão ter tendência a descer, tal como se pode observar na figura 4.16.

Na figura 4.17, estão presentes os dados relacionados com a evolução da absorção máxima de potência reativa nos vários geradores ao longo do tempo. De forma semelhante ao que se passou no caso A, os valores de absorção de todos os geradores operacionais descenderam, sendo que, alguns começaram mesmo a produzir potência reativa.

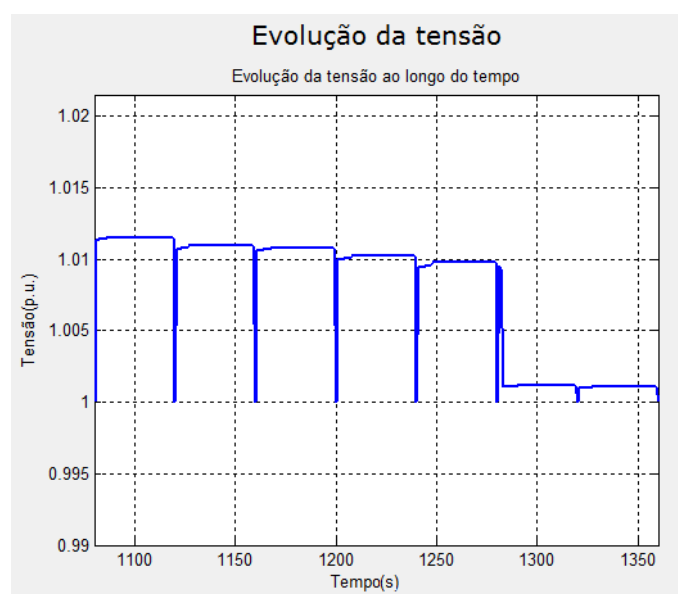


Figura 4.16: Evolução da tensão máxima da rede ao longo do tempo

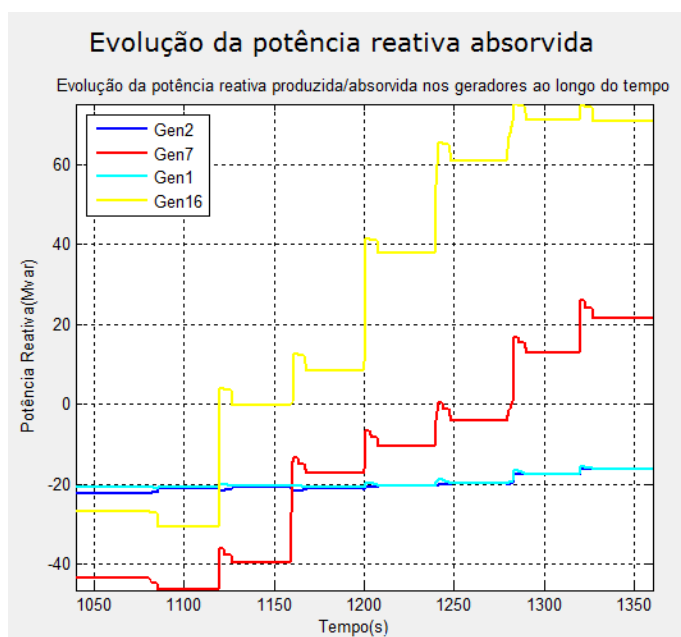


Figura 4.17: Evolução da absorção/produção de potência reativa nos vários geradores ao longo do tempo

4.4 Comparação entre o caso A e B

A construção do esqueleto da rede em ambos os casos é feita utilizando o mesmo algoritmo. No entanto, o tempo de reestabelecimento do serviço do esqueleto do caso A foi 40 segundos menor do que o tempo necessário ao reestabelecimento do serviço do esqueleto no caso B. Isto deveu-se às diferentes opções tomadas em ambos os planos. Ao observar os gráficos da evolução da absorção de potência reativa (4.2, 4.9) durante o reestabelecimento do serviço de ambos os casos conclui-se que no instante $t=700$ s, ou seja, vinte segundos antes de ser realizado um incremento de potência em ambos os casos, o valor da absorção de potência reativa no caso A é menor do que no B. A opção tomada no instante $t=560$ s, no plano gerado através do caso A, provocou esta diferença nos valores de absorção de potência reativa, pois esta linha é mais pequena (3.1) do que a linha energizada no mesmo instante no plano gerado pelo caso B. Devido a isso, teve que ser realizado mais um incremento de carga no reestabelecimento do serviço do esqueleto do caso B, para que fosse possível continuar a energizar linhas de transmissão.

Na fase de reposição de cargas também não são registadas diferenças significativas, sendo o tempo total de reestabelecimento do serviço em ambos os planos idêntico. É possível observar que o plano de reposição de cargas no caso A realizou mais um incremento de carga do que no caso B, esta diferença deveu-se à diferença de incrementos realizada durante a fase de reestabelecimento do serviço do esqueleto em ambos os casos. No entanto, é possível observar nos gráficos da evolução da variação de frequência de ambos os casos (4.5, 4.14), que grande parte dos incrementos realizados no caso A são feitos provocando a maior variação de frequência possível, estando assim

muito perto de um valor ideal. Os incrementos de potência que geram uma variação de frequência com um valor mais distante do que o limite aceitável foram gerados de forma a equilibrar a potência incrementada em cada manobra, ou seja, para não existir um incremento de potência que gerasse uma variação de frequência muito pequena. Embora esta diferença entre os dois planos gerados para a reposição de cargas, é possível concluir que o plano gerado pelo caso B apresenta melhores resultados. Apesar disso, caso a rede fosse maior, os tempos totais necessários à reposição de serviço em ambos os casos seriam diferentes. Sendo o tempo no caso B menor do que no caso A. No entanto, como a rede utilizada neste trabalho apresenta uma dimensão reduzida, não é possível analisar essa diferença.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

5.1 Conclusão

Nos últimos anos os SEE, têm vindo a sofrer uma contínua evolução, tornando-se mais complexos e maiores. Estão agora presentes, nos vários SEE espalhados pelo globo, unidades de produção e tecnologias que não existiam há cerca de trinta anos. Esta constante transformação do SEE requer que a área relativa à reposição de serviço de SEE seja continuamente estudada, e que os planos de reposição de serviço para as redes sejam revistos e reformulados. O aumento da dependência por parte dos utilizados do fornecimento de energia leva a que estes planos restaurem o sistema o mais rapidamente possível, pois as consequências de um *blackout* total podem ser catastróficas. Uma diferença de minutos num processo de reposição de serviço pode agravar essas consequências ou reduzi-las significativamente. Por isso, a tarefa de conceção de planos de reposição de serviço, que sejam velozes a efetuar o restauro da rede e que não ponham em questão qualquer limite técnico ou regulamentar da mesma, é importantíssima.

Em suma, o trabalho para esta dissertação consistiu no desenvolvimento de uma aplicação capaz de gerar planos de RS, tendo sido desenvolvidos dois casos capazes de o fazer, de forma diferente. Ambos os casos utilizaram um método de decisão empírico para realizar o restauro do esqueleto da rede, sendo que a diferença entre os dois reside na etapa de restauro de cargas. O caso A utiliza um método de decisão empírico para identificar os passos do processo de reposição. O segundo, o B, utiliza uma meta-heurística do tipo PSO para identificar a sequência que deve ser seguida pelo operador. Este tipo de metas-heurísticas foi inspirada no comportamento de enxames e cardumes, e o uso em problemas de otimização, como é a reposição de serviço, pode trazer resultados bastante satisfatórios. Esta meta-heurística permitiu obter incrementos de carga que resultaram em variações de frequência próximos do limite estabelecido. Embora o tempo total de reposição nos dois planos analisados seja idêntico, é possível afirmar que o uso do caso B, numa rede de maior tamanho, com um maior quantidade de potência a restaurar, poderia provocar uma redução no tempo total de reposição. No entanto, a sua utilização neste trabalho pode ser questionável. Tendo em conta, que esta meta-heurística foi aplicada somente na fase de reposição de cargas e que a única variável que esta analisa é a variação de frequência, os mesmos resultados

poderiam ter sido atingidos através de um melhoramento do método de incremento de cargas utilizado no caso A.

Devido às limitações do *software* utilizado, a aplicação elaborada não poderia ser usada para criar planos em redes elétricas reais. Sendo o MATPOWER uma plataforma relativamente simples se comparada com outras aplicações como o EUROSTAG ou PSSE, as simulações criadas não têm em conta alguns parâmetros característicos do processo de RS, tal como as tensões transitórias e outros. O MATPOWER também não possui modelos de regulação de tensão e velocidade nem limitadores de sub-excitação para as unidades de produção, afastando assim ainda mais as simulações criadas de um caso real.

5.2 Perspetivas futuras

O trabalho desenvolvido resultou numa aplicação com duas diferentes formas de elaborar planos de RS. Tendo em conta os argumentos explicados na secção 5.1, conclui-se que existem vários aspetos em que esta aplicação pode ser melhorada. De seguida, são expostos, de uma forma sintetizada os diferentes melhoramentos de aspetos e implementações que poderiam ser aplicados no trabalho desenvolvido.

- *Software* – O *software* utilizado apresenta fraquezas, pois um plano de RS deve ser elaborado através de simulações o mais próximo possível da realidade. Logo, a conceção deste trabalho, utilizando um *software* com a mesma capacidade de elaborar algoritmos, de comunicação entre estes e os resultados dos trânsitos, mas como uma melhor capacidade de realizar simulações próximas da realidade, faria com que uma aplicação semelhante à criada pudesse ser utilizada por empresas de energia.
- Meta-heurística – Neste trabalho, devido aos problemas explicados anteriormente (3.3.1) não foi possível utilizar a meta-heurística durante a construção do esqueleto da rede. A aplicação de uma meta-heurística de qualquer tipo, não só durante a fase de restauro de cargas mas também durante a etapa de construção do esqueleto da rede, resultaria em planos de RS mais satisfatórios.
- Universalidade – Embora a aplicação desenvolvida tenha sido criada para gerar planos de RS para qualquer rede elétrica, esta faceta da aplicação não foi testada. O teste, e possível correção de alguns aspetos traduzir-se-ia na capacidade de esta aplicação gerar planos de RS para qualquer rede elétrica.
- Tempos de arranque – Os tempos de arranque utilizados nas simulações elaborado estão bastante distantes do seu valor real, por razões anteriormente explicadas (4.1.2). Estes podem ser alterados de forma que as simulações fiquem mais próximas do real.
- Incrementos de potência – O valor mínimo para os incrementos de potência é de 1 MW, tal como foi explicado anteriormente (4.1.2). Este valor encontra-se distante dos valores reais,

sendo que, em alguns sistemas, existem cargas que devem ser alimentadas na sua totalidade através de um só incremento. Esse tipo de situações não é prevista neste trabalho. Pelo que a sua consideração numa nova versão desta aplicação teria resultados benéficos para a mesma.

- Reposição de serviço utilizando ilhas elétricas – A aplicação elaborada não é capaz de realizar planos de reposição de serviço em redes em que exista mais de um gerador com capacidade de *black-start* em diferentes barramentos. A introdução desta opção levaria a que o plano de reposição de serviço realizasse manobras em paralelo, criando assim ilhas elétricas que mais tarde seriam conectadas. A conceção desta faceta traria grandes benefícios a esta aplicação, visto que assim realizaria planos de RS mais realistas.

Anexo A

Guia de utilização

A.1 Como utilizar a aplicação

Nesta secção, far-se-á uma breve descrição do funcionamento da aplicação desenvolvida. O primeiro passo é abrir o MATLAB. De seguida, o utilizador deve localizar a pasta, denominada "GeraRS", em que a aplicação está presente. Esta contém uma pasta relativa ao *software* MATPOWER e outra relativa à aplicação desenvolvida. A procura das pastas deve ser feita através da janela assinalada com um retângulo vermelho na figura A.1. Na pasta "GeraRS", o utilizador deve executar o comando "add to path" tal como é demonstrado na figura A.1, através de dois retângulos azuis. Para que possa visualizar este comando, basta clicar no botão direito do rato com o ponteiro sobre a pasta em que o deseja executar. Note-se que, quer na pasta "MATPOWER" quer a pasta "AppRS" deve ser executado o comando "add to path", caso contrário a aplicação não funcionará corretamente.

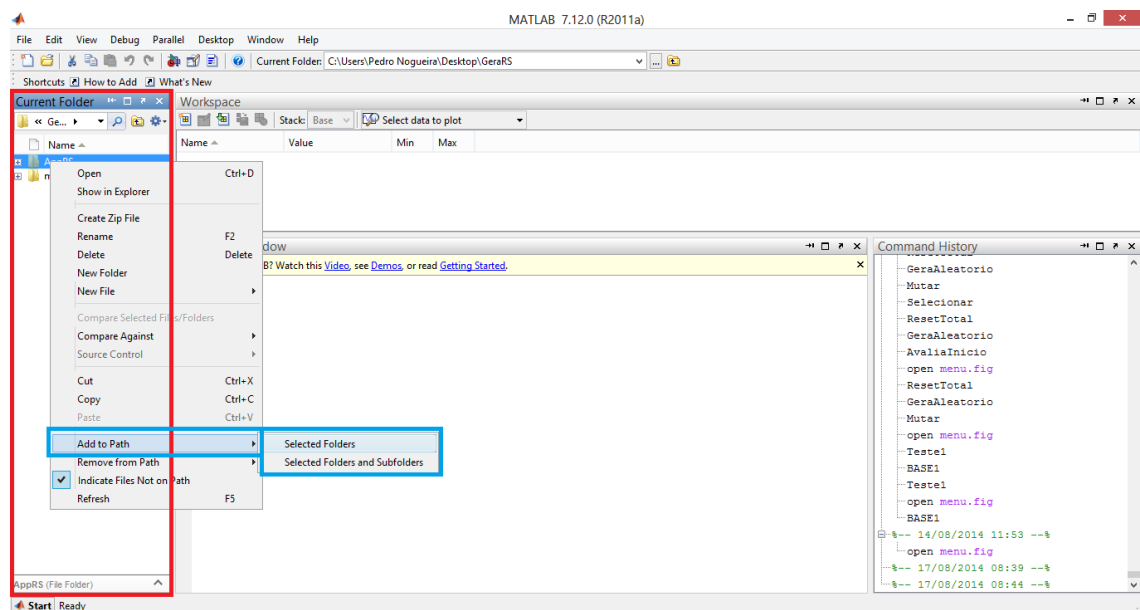


Figura A.1: Exemplo de execução do comando "add to path"

De seguida, o utilizador deve abrir a pastar "AppRS" e clicar duas vezes na variável "Workspace.mat", representada a vermelho na figura A.2. Esta ação vai introduzir no MATLAB as variáveis necessárias ao funcionamento da aplicação, as quais se mostram no retângulo verde na figura A.2. Por fim, o utilizador deve escrever o comando "open menu.fig" na linha de comandos do MATLAB, tal como está representado a azul na figura A.2.

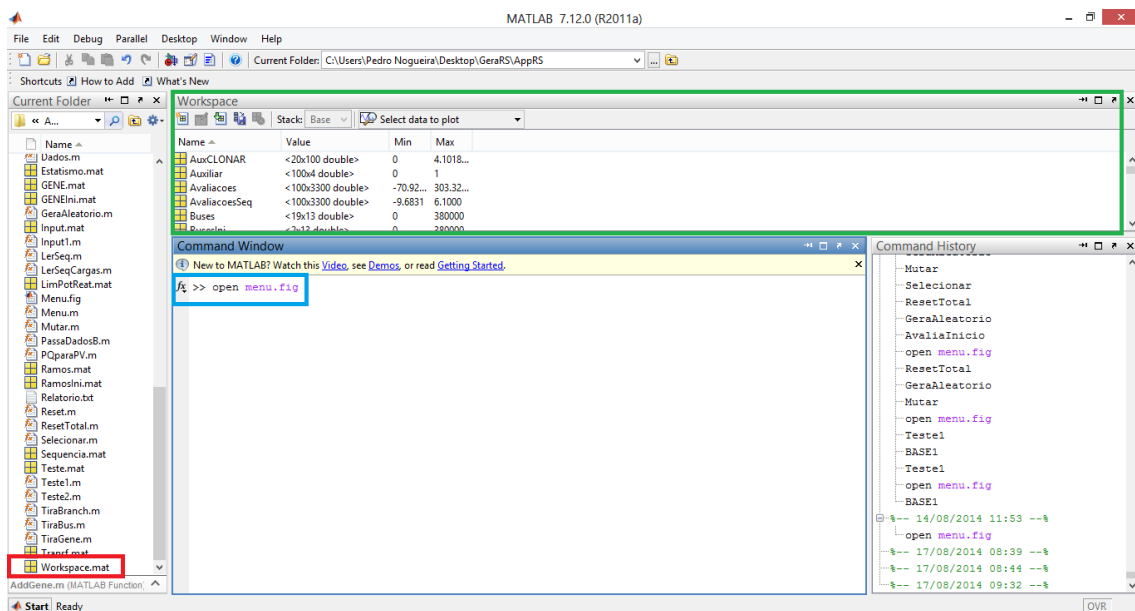


Figura A.2: Exemplo de ações que devem ser realizadas pelo utilizador para garantir o funcionamento da aplicação elaborada

Após a execução do comando "open menu.fig" o menu principal da aplicação é mostrado ao utilizador. Este pode ser observado na figura A.3.

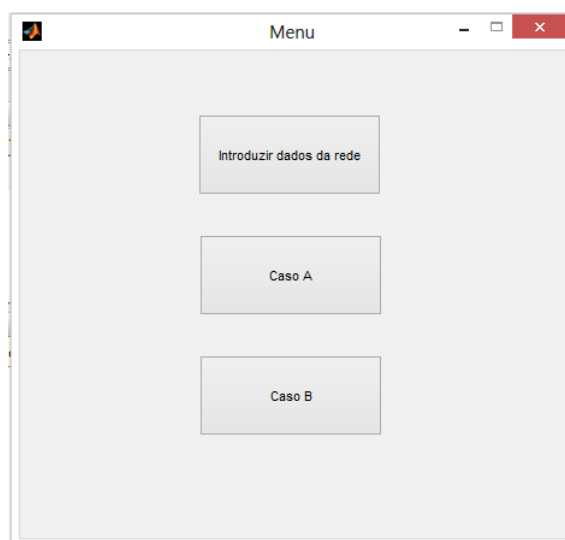


Figura A.3: Menu principal da aplicação

O menu, apresentado na figura A.3, contém três botões. O primeiro a que o utilizador deve aceder é o botão denominado "Introduzir dados da rede". Ao fazê-lo, surge um outro menu que pode ser observado na figura A.4. Neste menu, a primeira ação que deve ser realizada pelo utilizador é um clique no botão "Mostrar Dados", que se encontra dentro de um retângulo vermelho na figura A.4. O clique neste botão introduz os dados da rede pré-definida nas diversas tabelas representadas da figura. Estes podem ser editados diretamente nas tabelas, caso seja necessário acrescentar ou retirar linhas. Por exemplo, na tabela correspondente aos geradores, basta clicar nos botões "Mais Geradores" ou "Menos Geradores" de acordo com a preferência do utilizador. Quando uma tabela estiver de acordo com a preferência do utilizador, este deve carregar no botão "Introduzir dados", para inserir as modificações pretendidas nas variáveis da aplicação.

Linhas de transmissão

	De	Para	Resistência (p.u.)	Reactância (p.u.)	Susceptância (p.u.)	A restaurar?
1	3	4	0.0021	0.0229	0.2787	1
2	3	6	0.0021	0.0229	0.2787	1
3	6	17	0.0021	0.0229	0.2787	1
4	6	8	0.0031	0.0342	0.4180	1
5	10	17	0.0021	0.0229	0.2787	1
6	12	17	0.0021	0.0229	0.2787	1
7	17	19	0.0021	0.0229	0.2787	1

Transformadores

	De	Para	Resistência (p.u.)	Reactância (p.u.)	A restaurar?
1	3	1	1.8500e-04	0.0077	1
2	3	2	1.8500e-04	0.0077	0
3	5	4	1.8500e-04	0.0077	1
4	7	6	1.8500e-04	0.0077	1
5	9	8	1.8500e-04	0.0077	1
6	11	10	1.8500e-04	0.0077	1
7	13	12	1.8500e-04	0.0077	1

Geradores

	Barramento	Potência Aparente (MVA)	Fator de Potência	Black-Start	Estatismo	Absorção max. de Pot. Reat.(Mvar)	Tempo de Arr.
1	1	152	0.8500	0	0.0500	60	
2	2	158	0.9000	1	0.0500	48	
3	7	231.6000	0.9500	0	0.0500	71	

Cargas

	Barramento	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVar)	A restaurar?
1	5	90	30	1
2	7	90	30	1
3	9	90	30	1
4	11	90	30	1
5	13	90	30	1
6	15	90	30	1
7	16	90	30	1
8	18	90	30	1

Dados Gerais

	Frequência (Hz)	Limite de Tensão Inf. (p.u.)	Limite de Tensão Sup.(p.u.)	Variação máxima de freq. aceite (Hz)	Tan (phi)
1	50	0.9500	1.1000	-0.2000	0.4000

Mostrar Dados

Figura A.4: Janela em que os dados da rede são introduzidos

Estando a introdução de dados da rede concluída, o utilizador pode fechar a janela de introdução de dados relativos à rede e pode proceder à execução dos casos A ou B, de acordo com as suas preferências. Por exemplo, se o utilizador desejar usar o caso A para gerar planos de RS, deve clicar no "Caso A", da janela relativa ao menu principal presente na figura A.3.

Na figura A.5, encontra-se um exemplo de um plano de RS gerado pelo caso A. Para gerar um plano de RS, o utilizador deve carregar no botão "Iniciar Aplicação" e aguardar alguns minutos até a elaboração do plano estar concluída. Quando o plano estiver concluído, a sequência de manobras e o respetivo tempo que cada uma requer para ser executado são demonstrados nas tabelas "Restauro do esqueleto" e "Restauro das cargas". Assim, em cada uma está presente o plano para restaurar o esqueleto da rede e o plano para restaurar as cargas da rede, respetivamente.

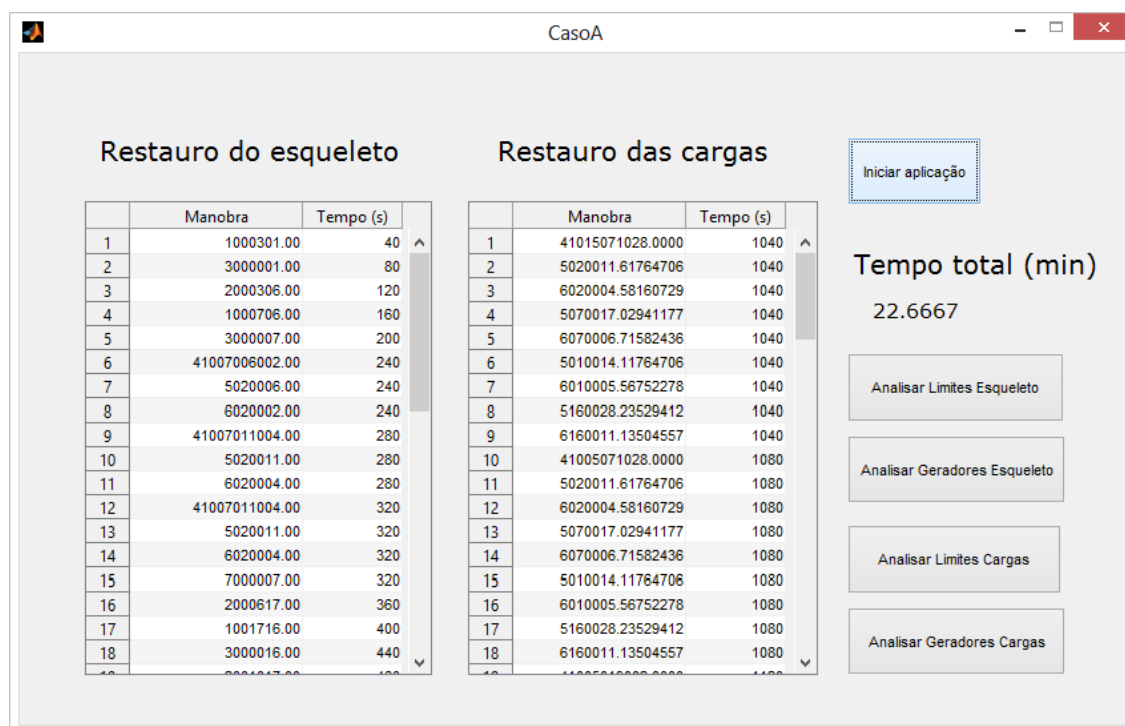


Figura A.5: Menu relativo ao caso A

Por baixo do botão "Iniciar Aplicação" o tempo total do processo de RS é apresentado em minutos e por baixo desse tempo existem quatro botões. As ações realizadas ao clicar em cada um são explicadas de seguida:

- Analisar Limites Esqueleto – Abre uma janela onde estão presentes os gráficos reativos à evolução da variação de frequência e da tensão ao longo do tempo durante a realização do plano de restauro do esqueleto;
- Analisar Geradores Esqueleto – Abre uma janela com os gráficos relativos à evolução da produção de potência ativa e produção/absorção de potência reativa ao longo do tempo por parte dos geradores durante, o plano de restauro do esqueleto;
- Analisar Limites Cargas – Abre uma janela onde estão presentes os gráficos relativos à evolução da variação de frequência e da tensão ao longo do tempo durante a realização do plano de restauro das cargas;
- Analisar Geradores Cargas – Abre uma janela com os gráficos relativos à evolução da produção de potência ativa e produção/absorção de potência reativa ao longo do tempo por parte dos geradores durante, o plano de restauro das cargas.

Caso o utilizador deseje usar o caso B para elaborar um plano de RS, basta clicar no botão "Caso B", presente na figura A.3, no menu principal da aplicação. Ao clicar nesse botão a janela presente na figura A.6 é aberta. Em semelhança com o caso A, o utilizador deve carregar no botão

"Iniciar aplicação" para gerar um plano de RS. Embora a disposição dos botões ("Analisar Limites Esqueleto", "Analisar Geradores Esqueleto", "Analisar Limites Cargas", "Analisar Geradores Cargas") seja diferente, estes desempenham as mesmas funções explicadas anteriormente. Sendo assim, a diferença entre esta janela e a presente no caso A é a tabela em que o utilizador pode definir o número de gerações, o número de indivíduos iniciais e o gráfico que mostra a evolução do valor da função *fitness* ao longo do tempo.



Figura A.6: Menu relativo ao caso B

A.2 Guia para codificação

A informação relativa às manobras presente nas tabelas encontra-se codificada e embora esta codificação já tenha sido explicada no capítulo 3, será feita uma nova explicação mais resumida nesta secção, de forma a facilitar o trabalho de descodificação da mesma ao utilizador. Os números utilizados para codificar as diferentes sequências possuem sete ou onze algarismos de acordo com as ações que se queiram codificar.

A.2.1 Número com sete algarismos

Na imagem A.7, é possível observar um exemplo de codificação de um transformador entre os barramentos sete e seis. Nesta imagem o número responsável pela codificação encontra-se dividido

em quatro parcelas, cujo significado é explicado de seguida.

1 00 07 06

Figura A.7: Número que codifica a energização de um transformador com as suas diferentes parcelas de codificação coloridas

- Parcela Azul – Está presente o número que codifica a ação a realizar. Este pode tomar diversos valores.
 - 1 – Energizar um transformador
 - 2 – Energizar uma linha de transmissão
 - 3 – Inicialização de um gerador
 - 5 – Aumento de produção de potência ativa
 - 6 – Aumento de produção de potência reativa
 - 7 – Entrada em serviço de um gerador
- Parcela Verde – Esta parcela só é utilizada nos incrementos de potência e é utilizada para indicar o barramento em que o incremento é feito.
- Parcela Vermelha – Esta parcela só é utilizada para energização de linhas de transmissão ou transformadores e indica o barramento de origem da linha de transmissão ou transformador.
- Parcela Castanha – Esta parcela é sempre utilizada, e o seu valor varia de acordo com o número presente na parcela azul.
 - 1 – Indica o barramento de destino do transformador
 - 2 – Indica o barramento de destino da linha de transmissão
 - 3 – Indica o barramento em que o gerador está presente
 - 5 – Indica o valor de potência ativa que será incrementado
 - 6 – Indica o valor de potência reativa que será incrementado
 - 7 – Indica o barramento em que o gerador que entrará em serviço se encontra.

A.2.2 Número com onze algarismos

Na figura A.8, é possível observar um exemplo de codificação de um incremento de 6 MW e 2 Mvar na carga presente no barramento sete. Nesta imagem, o número responsável pela codificação encontra-se dividido em quatro parcelas, cujo significado é explicado de seguida.

- Parcela Azul – Está presente o número que codifica a ação a realizar. Este pode tomar dois valores.
 - 41 – Primeiro incremento de potência da ação
 - 40 – Incrementos realizados a seguir ao primeiro mas que ainda fazem parte da mesma ação.
- Parcela Verde – Indica o barramento em que a carga será incrementada
- Parcela Vermelha – Indica a quantidade de potência ativa (MW) que será incrementada
- Parcela Castanha – Indica a quantidade de potência reativa (Mvar) que será incrementada

41 007 006 002

Figura A.8: Número que codifica um incremento de potência com as suas diferentes parcelas de codificação coloridas

Rede

A construção da aplicação requereu constantes testes, de forma a verificar se os algoritmos desenvolvidos desempenhavam a sua função de acordo com o que era expectável. Deste modo, foi necessário executar esses testes numa rede elétrica exemplo, semelhante a uma rede real. A rede elétrica e os parâmetros utilizados foram comuns aos diferentes casos da aplicação construída.

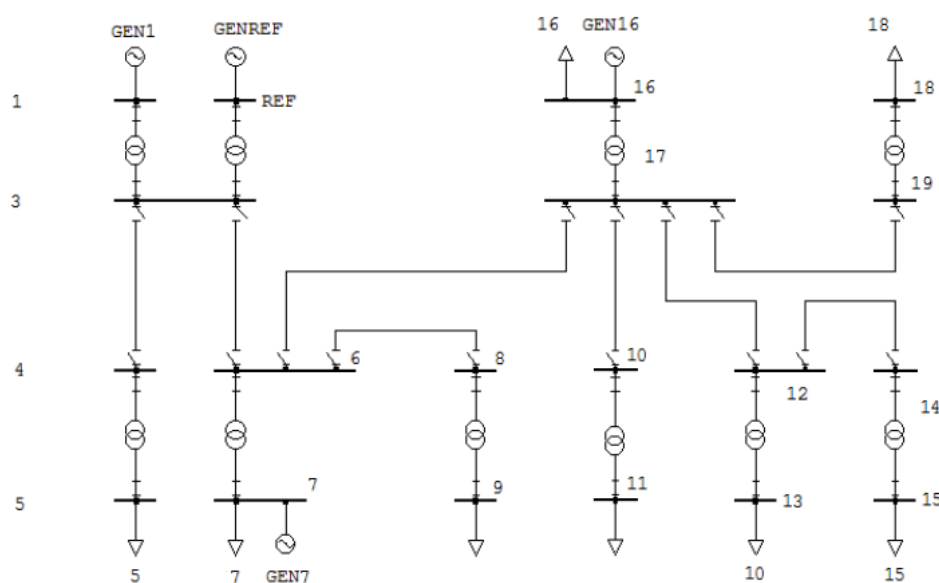


Figura B.1: Diagrama unifilar da rede utilizada para o desenvolvimento da aplicação

Este sistema permite realizar uma análise simples e eficaz de todos os parâmetros ao longo do processo de RS. Isto deve-se ao facto de o controlo das variáveis ser reduzido, pois somente as unidades de geração ficam encarregadas de manter os limites das variáveis críticas durante a RS. Também a pouca complexidade da rede em questão, não possuindo componentes de regulação e compensação que possam participar na RS, permite uma melhor análise de todo o processo.

B.1 Linhas de transmissão

Foi utilizada uma rede elétrica já existente [6] que pode ser observada na figura B.1, sendo esta constituída por dezanove barramentos, quatro máquinas síncronas, oito cargas, oito linhas de alta tensão em corrente alternada e oito transformadores com razão de transformação fixa.

Na tabela B.1, são apresentadas as características das várias linhas da rede. Estas integram o sistema de alta tensão (380 kV) e apresentam todas as mesmas características, registando-se diferenças somente no seu comprimento.

Tabela B.1: Características das linhas de transmissão

De-Para	Comprimento (km)	Resistência (p.u.)	Reactância (p.u.)	Susceptância (p.u.)
3-4	100	0.00208	0.02285	0.27869
3-6	100	0.00208	0.02285	0.27869
6-8	150	0.00311	0.0342	0.418
6-17	100	0.00208	0.02285	0.27869
10-17	100	0.00208	0.02285	0.27869
12-14	50	0.001	0.0114	0.139346
12-17	100	0.00208	0.02285	0.27869
17-19	100	0.00208	0.02285	0.27869

B.2 Unidades de produção

Na tabela B.2 estão presentes as características das unidades de produção utilizadas nesta rede. O gerador de referência escolhido para esta rede foi uma central hídrica. Esta escolha justifica-se pelo rápido tempo de arranque e pela capacidade de *blackstart* inerente a este tipo de centrais 2.2.8.1. Os geradores um e quatro encontram-se nos barramentos um e dezasseis respetivamente e operam utilizando uma turbina a vapor. Os geradores dois e três do tipo hídrico encontram-se nos barramentos dois e sete respetivamente. Na tabela B.2, também é possível observar a absorção máxima de potência reativa de cada gerador, sendo que esta característica é crucial no processo de RS.

Tabela B.2: Características dos geradores

Nome	GEN1	GEN2 (REF)	GEN7	GEN16
Tipo	Térmica	Hídrica	Hídrica	Térmica
Potência aparente(MVA)	192	158	231.6	384
Potência nominal (MW)	142	163	220	326
Fator de potência	0.85	0.9	0.95	0.85
Absorção máxima de potência reativa (Mvar)	60	48	71	120
Tensões aos terminais (kV)	18	13.8	13.8	24
Estatismo (Hz p.u. / p.u. MW)	0.05	0.05	0.05	0.05
Tempo de Arranque (min)	8	2	2	8

B.3 Transformadores

Dado que não se pretende que exista controlo da tensão nos terminais do primário ou do secundário, não devem existir, no sistema, transformadores com razão de transformação variável ou capazes de ajustar automaticamente as tomadas. Devido a isso, a razão de transformação dos transformadores presentes na rede é fixa. A tabela B.3 apresenta os parâmetros dos transformadores usados na rede.

Tabela B.3: Parâmetros dos transformadores

Resistência (p.u.)	Reactância(p.u.)
0.000185	0.00769

B.4 Cargas

As cargas estão representados na figura B.1, através de triângulos associados aos barramentos e todos possuem o mesmo número de potência ativa e reativa, respetivamente, 90 MW e 30 Mvar.

Referências

- [1] F. Maciel Barbosa. Estabilidade de sistemas elétricos de energia, Janeiro 2013.
- [2] Vladimiro Miranda. Computação evolucionária: Uma introdução, versão 2.0, Março 2005.
- [3] Prabha Kundur. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, 1994.
- [4] Ana Cardoso de Matos et al. *A Electricidade em Portugal: Dos primórdios à 2ª Guerra Mundial*. EDP, 2004.
- [5] Ivo Francisco Machado Vilarés. Análise comparativa do desempenho de algoritmos de estimação de estado considerando pmu(s). Tese de mestrado, FEUP, 2010.
- [6] Hélder Magalhães da Costa. Reposição de serviço em sistemas com produção eólica onshore e offshore com ligação dc. Tese de mestrado, FEUP, 2013.
- [7] Carlos Moreira. Integração de pd nas redes eléctricas, 2014. Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Produção Dispersa, disponível em https://sigarra.up.pt/feup/pt/conteudos_geral.ver?pct_pag_id=249640&pct_parametros=pv_ocorrenca_id=333849&pct_grupo=41276&pct_grupo=41421#41421.
- [8] T.E Dy Liacco et al. *The adaptive reliability control system*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1967.
- [9] Carlos Moreira. Introdução à estabilidade de tensão, 2012. Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Regimes Estacionários do SEE, disponível em https://sigarra.up.pt/feup/pt/conteudos_geral.ver?pct_pag_id=249640&pct_parametros=pv_ocorrenca_id=269557.
- [10] João Filipe Glória de Jesus. Grid architectures for offshore energy parks. Tese de mestrado, IST, 2010.
- [11] M. M. Adibi et al. *Power System Restoration – A Task Force Report*. IEEE Transactions on Power Systems, 1987.
- [12] J Kafka et al. *System Restoration Plan Development for a Metropolitan Electrical System*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981.
- [13] Luís Miguel Lopo dos Santos Seca. Estudo de estratégias de funcionamento em rede isolada e reposição de serviço em redes de distribuição com elevada componente de produção distribuída. Tese de mestrado, FEUP, 2006.
- [14] Tatjana Kostić. *Decision Aid Function for Restoration of Transmission Power Systems after a Blackout*. Tese de doutoramento, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1997.

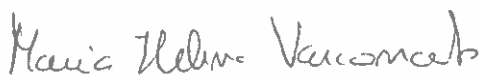
- [15] Daniel Lindenmeyer. *A Framework for Power System Restoration*. Tese de doutoramento, University of British Columbia, 2000.
- [16] M.M. Adibi et al. *Power System Restoration Issues*. IEEE Computer Applications in Power, 1991.
- [17] M. M. Adibi et al. *Power System Restoration Planning*. IEEE Transactions on Power Systems, 1994.
- [18] Lars Lindgren. Automatic power system restoration - application of a search algorithm. Tese de mestrado, FEUP, 2009.
- [19] D. Fogel. Evolutionary computation: Toward a new philosophy of machine intelligence (3rd ed.). NJ: IEEE Press, 2006.
- [20] J. Holland. Adaptation in natural and artificial systems. Cambridge, MA: MIT Press, 1992.
- [21] Hans-Paul Schwefel. *Numerische Optimierung von Computer-Modellen*. Tese de doutoramento, 1997.
- [22] S. Kirkpatrick; C. D. Gelatt; M. P. Vecchi. Optimization by simulated annealing. *Science*, 1983.
- [23] R. Kennedy, J.; Eberhart. Particle swarm optimization. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks IV*, 1995.
- [24] V. Miranda e N. Fonseca. Epso – best-of-two-worlds meta-heuristic applied to power system problems. 2002.
- [25] Melanie Mitchell. *An Introduction to Genetic Algorithms*. The MIT Press, 1998.
- [26] Nicholas Metropolis et al. Equation of state calculations by fast computing machines. *The journal of Chemical Physics*, 1953.
- [27] *MATLAB Primer, R2014a*. The MathWorks, Inc., 2014.
- [28] C. E. Murillo-Sanchez R. D. Zimmerman e R. J. Thomas. Matpower: Steady-state operations, planning and analysis tools for power systems research and education. Power Systems, IEEE Transactions, Fevereiro 2011.
- [29] Ray D. Zimmerman e Carlos E. Murillo-Sanchez. *Matpower 5.0b1 User's Manual*. Power Systems Engineering Research Center, 2014.

A Dissertação intitulada

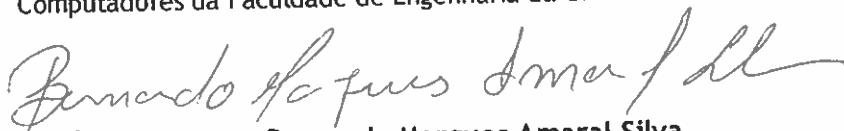
“Identificação Expedita de Soluções de Reposição de Serviço em Redes de Transmissão”

foi aprovada em provas realizadas em 24-09-2014

o júri



Presidente **Professora Doutora Maria Helena Osório Pestana de Vasconcelos**
Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professor Doutor Bernardo Marques Amaral Silva
Professor Auxiliar do Instituto Universitário da Maia



Professor Doutor João Abel Peças Lopes
Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.



Autor - Pedro Figueiredo Nogueira

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto