



INÊS DOLORES PIRES NEVES

RESILIÊNCIA A FALHAS EM MICRORREDES

MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

Universidade NOVA de Lisboa
Janeiro, 2022

RESILIÊNCIA A FALHAS EM MICRORREDES

INÊS DOLORES PIRES NEVES

Orientador: João Francisco Alves Martins
Professor Associado com Agregação, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Ana Inês da Silva Oliveira
Professora Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Arguente: João Miguel Murta Pina
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Orientador: João Francisco Alves Martins
Professor Associado com Agregação, Universidade NOVA de Lisboa

Resiliência a falhas em microrredes

Copyright © Inês Dolores Pires Neves, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a todos aqueles que direta ou indiretamente, me apoiaram ao longo de todo este processo que me permitiu elaborar e terminar esta dissertação. Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor João Martins, por todo o apoio, motivação, disponibilidade e paciência para além de todos os conselhos e conhecimento científico transmitidos ao longo deste percurso.

Agradeço do fundo do meu coração ao meu pai, por ser a melhor pessoa que conheço, por ser meu pai, meu professor, meu apoiante, meu amigo, meu fã incondicional. Por saberes quando preciso de um abraço sem serem precisas palavras, Obrigado. Agradeço à minha mãe que mesmo a milhares de quilómetros de distância me apoia sem vacilar, que me conhece melhor do que eu me conheço a mim mesma, que sempre me incentivou e deu forças. Pela dedicação e mimo constante, Obrigado.

Agradeço à minha irmã que deste seu jeito só dela, diz a coisa certa no momento certo sem saber. Por toda a confiança que tens em mim, Obrigado. Agradeço ao Carlos que deste seu jeito só dele, me foi encorajando. Pelos momentos de descontração e partilha que me proporcionas, Obrigado.

Agradeço à minha família e aos meus amigos, pela energia, pela amizade, pela compreensão, pelos conselhos, pelas longas conversas, por me deixarem chorar e me fazerem rir quando preciso. A todos, mas em especial, ao Zé Gonçalo, à Mariana, e ao Diogo, Obrigado.

Agradeço por fim ao meu namorado, Ricardo, meu eterno apoiante, por teres estado ao meu lado a cada minuto deste longo percurso, pelo amor e serenidade, pela confiança e dedicação, pela força e motivação, pela paciência e carinho. Por me fazeres acreditar em mim mesma, o meu mais sincero Obrigado.

“Life is a play that does not allow testing. So, sing, cry, dance, laugh and live intensely, before the curtain closes and the piece ends with no applause. ” (Charlie Chaplin)

RESUMO

Uma rede elétrica deve ser capaz de responder a perturbações, como eventos climáticos extremos, evitando provocar interrupções prolongadas em consumidores finais que poderiam causar perdas económicas significativas. O desenvolvimento das redes inteligentes e das microrredes são apontados como formas de melhorar a resiliência, permitindo que, em caso de necessidade, as microrredes se possam desligar e religar à rede principal com o mínimo de disrupção no serviço às suas cargas.

Este trabalho pretendeu estudar a resiliência das microrredes, e determinar soluções otimizadas com o objetivo de garantir que uma microrrede possa subsistir a falhas na sua ligação à rede principal, usando a geração dispersa no seu interior, a flexibilidade oferecida pelos consumidores e o uso de reconfiguração num contexto de um controlo local associado a uma comunidade energética inteligente.

O processo implementado na rede usada como estudo de caso permitiu obter a solução ótima na perspetiva da indisponibilidade com 3 troços adicionais, que é simultaneamente a solução ótima na perspetiva da energia não servida já que corresponde a uma capacidade total da rede subsistir, fazendo uso da capacidade de produção local e da flexibilidade de cargas. As soluções obtidas correspondem à possível localização de novas interligações que permitirão aumentar a resiliência da rede, evitando falhas de fornecimento.

Palavras-chave: Flexibilidade, microrredes, otimização, redes de distribuição, resiliência

ABSTRACT

An electric network must be able to respond to disturbances, such as extreme weather events, to avoid causing prolonged interruptions to final consumers that could result in significant economic losses. The development of smartgrids and microgrids, are being pointed out as potential solutions for resilience problems, allowing, in case of need, the microgrids to be disconnected and reconnected to the main grid with minimal disruption to the end users.

This work aimed to study the resilience of microgrids, and determine optimized solutions in order to ensure that a microgrid can survive failures in its connection to the main network, using dispersed generation within it, the flexibility offered by consumers and the use of reconfiguration in a context of local control associated with an intelligent energy community.

The application of the proposed process to the network used as a case study allowed the optimal solution to be obtained in terms of unavailability with 3 additional interconnections, which is simultaneously the optimal solution in terms of unserved energy, corresponding to a situation in which the network to subsist, making use of local generation and load flexibility. The obtained solutions correspond to the possible locations of new interconnections that will increase the resilience of the network, avoiding supply failures.

Keywords: Distribution networks, flexibility, microgrids, optimization, resilience

ÍNDICE

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Siglas	xiv
Símbolos	xv
1 Introdução	1
1.1 Motivação e Objetivos	2
1.2 Estrutura do documento	3
2 Revisão Bibliográfica	4
2.1 Microrredes de Distribuição de Energia Elétrica	4
2.2 Fiabilidade e Resiliência de redes elétricas	6
2.2.1 Fiabilidade	6
2.2.2 Resiliência	7
2.3 Flexibilidade dos consumidores	8
2.4 Reconfiguração de redes de distribuição	12
2.5 Métodos de Otimização	14
2.6 Estado da arte	17
3 Proposta de Metodologia	21
3.1 Definição de uma rede para estudo	22
3.2 Obtenção de dados de consumo e flexibilidade	23
3.3 Determinação da capacidade de subsistência	25

3.4	Análise da resiliência da rede	27
3.5	Reconfiguração da rede	28
3.5.1	Representação de uma solução	29
3.5.2	Algoritmo <i>Simulated Annealing</i>	30
3.5.3	Abordagem Multi-objetivo com <i>Simulated Annealing</i> . .	32
3.6	Determinação de configuração em caso de falha	34
4	Estudo de Caso	36
4.1	Escolha da rede de teste	37
4.1.1	Definição de dados de consumo	38
4.1.2	Definição de dados de produção	39
4.1.3	Validação e correção da rede escolhida	41
4.2	Análise de Resultados	43
4.2.1	Teste de indisponibilidade	43
4.2.2	Reconfiguração para minimizar indisponibilidades	44
4.2.3	Reconfiguração com custo como segundo objetivo	47
4.2.4	Reconfiguração com três objetivos	49
4.2.5	Teste à determinação da configuração ótima	52
5	Conclusões	55
5.1	Possibilidades de trabalho futuro	56
	Bibliografia	58
	Anexos	
I	Dados de simulação do modelo de Richardson	68
II	Rotinas MATLAB	73
II.1	Descrição das rotinas	73
II.1.1	Preparação de dados	73
II.1.2	Rotinas de Otimização	76
II.1.3	Análise de resultados	80
II.2	Guia de utilização	82
II.2.1	Preparação de dados	82
II.2.2	Estudo de resiliência	85

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Ilustração do impacto da DR num perfil de carga residencial [27] . .	9
2.2	Secção de rede com possibilidade de reconfiguração [42]	13
3.1	Exemplo de uma rede padrão IEEE de 30 barramentos	22
3.2	Entrada de dados para o modelo de Richardson [71]	24
3.3	Exemplo de diagramas resultantes do modelo de Richardson [71] . .	25
4.1	Microrrede de referência da CIGRE	38
4.2	Agregação de cargas residenciais por nó	39
4.3	Produção eólica nacional e diagrama obtido após transformação . .	41
4.4	Análise da primeira proposta de dados para a rede em estudo	41
4.5	Potencial de produção, carga e flexibilidade disponível	42
4.6	Disponibilidades temporais das sub-redes isoladas	43
4.7	Energia não servida por perda total de carga ou corte seletivo	44
4.8	Disponibilidades das sub-redes sem o uso da flexibilidade	44
4.9	Evolução do processo <i>simulated annealing</i>	45
4.10	Representação da melhor solução encontrada	46
4.11	Evolução do processo <i>simulated annealing</i> para 2 troços	47
4.12	Conjunto de soluções não dominadas, abordagem bi-objetivo	48
4.13	Conjunto de soluções não-dominadas com três objetivos	49
4.14	Conjunto de soluções não-dominadas (3D)	51
4.15	Conjunto de soluções não-dominadas (3D com superfície)	51
4.16	Configuração ótima resultante do corte do troço 3 – 5	52
4.17	Configuração ótima resultante do corte do troço 5 – 6	54
4.18	Energia não servida para um corte no troço 5 – 6	54

II.1	Diretoria com os ficheiros de dados base	82
II.2	Resultados da execução da função <i>inicializacao()</i>	83
II.3	Agregação de cargas residenciais por nó	83
II.4	Potencial de produção, carga e flexibilidade	84
II.5	Resultados do teste de resiliência	85
II.6	Output do função <i>sa(...)</i>	86
II.7	Conjunto de soluções não dominadas, abordagem bi-objetivo	87
II.8	Conjunto de soluções não-dominadas (3D)	87
II.9	Conjunto de soluções não-dominadas (3D com superfície)	88
II.10	Árvore de menor custo	88
II.11	Energia não servida para um corte no troço 5 – 6	89

ÍNDICE DE TABELAS

4.1	Dados dos troços da rede CIGRE	37
4.2	Conjunto de soluções não dominadas	48
4.3	Conjunto de soluções não dominadas da análise tri-objetivo	50
4.4	Configuração ótima resultante do corte do troço 3 – 5	53
I.1	Afetação dos diagramas de carga aos nós da rede de teste	68
I.2	Afetação dos novos diagramas de carga aos nós da rede de teste	68
I.3	Dados de simulação com 26 habitações	69
I.4	Dados de simulação das 8 habitações extra	72

SIGLAS

BPA	Bonneville Power Administration 10 , 11
CEI	Comunidades Energéticas Inteligentes 2
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Electriques xi , xiii , 36 , 37 , 38
DR	Demand Response xi , 9 , 10 , 11 , 12 , 19
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers xi , 20 , 22
NIST	Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia 12
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System 40
REN	Redes Energéticas Nacionais 40
RGD	Recurso de Geração Distribuída 2 , 5 , 6 , 9
SA	Simulated Annealing 31 , 32
SMOSA	Suppapitnarm's Multi-Objective Simulated Annealing 32 , 33 , 47

SÍMBOLOS

α	fator de decaimento 45, 46
E_{NS}	energia não servida 34
$P_{Di}(\Delta t)$	potência pedida pelas cargas do nó i 25
$P_{\text{flex}}(\Delta t)$	potência total disponível na sub-rede em cargas flexíveis num período de duração Δt 26
$P_{Gi}(\Delta t)$	potência potencialmente fornecida pelas unidades de geração ligadas a um nó i 25
$P_{\text{grid}}(\Delta t)$	potência pedida por uma dada sub-rede com N nós num período de duração Δt 25, 26, 34
$P_i(\Delta t)$	potência pedida num nó i para um dado instante 25, 26
T_{final}	temperatura final 45, 46
T_I	tempo de indisponibilidade 26
T_0	temperatura inicial 45, 46

INTRODUÇÃO

A transição energética que neste momento se procura concretizar inclui uma aposta considerável no aproveitamento de recursos renováveis distribuídos, beneficiando da diminuição do custo destas tecnologias e dos estímulos políticos para o seu financiamento. Contudo, a expansão destes recursos também provoca alterações na forma de gestão do sistema elétrico que tem cada vez mais de incorporar processos dinâmicos e baseados na obtenção e circulação de informação em tempo real, as designadas *smart-grids*.

Em sistemas de energia baseados em produção convencional, o equilíbrio do sistema é mantido com base no planeamento da geração e na existência de um sistema de controlo de frequência e tensão garantido pelas unidades de geração. No entanto, no processo atual de transição energética, a complexidade dos sistemas está a aumentar. Por um lado, as cargas são cada vez mais sensíveis, sendo cada vez mais importante garantir a qualidade do serviço. Por outro lado, o aumento da dependência da geração renovável aumenta a imprevisibilidade da própria produção, tornando mais complicado garantir o constante equilíbrio entre a oferta e a procura.

De acordo com a Agência Internacional de Energia, uma *smart-grid* é uma rede elétrica que usa tecnologias digitais para monitorizar e gerir a transmissão de energia elétrica de todas as fontes para satisfazer as necessidades em contínua variação dos utilizadores finais. Numa *smart grid*, são coordenadas as necessidades e capacidades de todos os produtores, operadores de rede, utilizadores finais e restantes partes interessadas no mercado, de forma a operar todo o sistema de forma tão eficiente quanto possível, minimizando os custos e os impactos ambientais, mas mantendo os níveis de fiabilidade, resiliência e estabilidade [1].

Entre os diversos objetivos esperados para uma rede elétrica moderna, uma *smart grid* deve ser capaz de responder a perturbações através de uma monitorização contínua de forma a detetar, responder e recuperar de contingências imprevisíveis [2], como os eventos climáticos extremos cujo impacto em sistemas de distribuição pode resultar em interrupções prolongadas para clientes finais e em perdas económicas significativas [3].

Um dos objetivos do desenvolvimento das *smart grids* é precisamente facilitar o processo de balanceamento da rede através de um fluxo paralelo de informação que permite um controlo dinâmico e fino das redes elétricas. Nesse contexto, as microrredes são apontadas como uma das potenciais soluções para os problemas de gestão de rede [4]. O objetivo é fazer com que as microrredes possam funcionar autonomamente em caso de necessidade desligando-se e religando-se com o mínimo de disrupção no serviço às suas cargas e à restante rede. Para isso as microrredes devem ter recursos de geração e recursos de armazenamento, além de cargas controláveis.

1.1 Motivação e Objetivos

A microrrede é uma das formas de materialização de *smart grids* que se espera poder contribuir significativamente para melhorar o nível de resiliência da rede [4]. As microrredes são sistemas que têm pelo menos um **Recurso de Geração Distribuída** (RGD) e cargas, e que conseguem formar “ilhas” intencionais dentro do sistema de distribuição. Dentro das microrredes, as cargas e as fontes de energia podem ser desligadas e religadas ao sistema elétrico com a mínima disrupção das cargas locais [5]. Em teoria, uma microrrede poderá continuar a sua operação e fornecer energia mesmo quando a rede primária sofre uma falha grave.

Prevê-se também que a futura rede elétrica ao nível da distribuição possa ser dividida em redes regionais compostas por *clusters* de **Comunidades Energéticas Inteligentes** (CEI) [6]. Cada CEI será composta por múltiplas residências e/ou instalações de serviços com várias formas de cargas elétricas (eletrodomésticos, veículos elétricos, entre outros) e tecnologias de geração distribuída. Um sistema de controlo local fará a gestão da geração e da procura dentro da comunidade para atender a diversos objetivos, influenciando o consumo de energia e o fluxo de energia dentro da CEI. O controlo global sobre os aglomerados de comunidades

de energia será depois necessário para regular a rede elétrica e otimizar o sistema eletroprodutor.

Pretende-se com este trabalho estudar formas de aumentar a resiliência das microrredes, procurando garantir que uma microrrede possa subsistir a falhas na sua ligação à rede principal, usando a geração dispersa no seu interior, a flexibilidade oferecida pelos consumidores e o uso de reconfiguração num contexto de um controlo local associado a uma comunidade energética inteligente. Como resultado, pretende-se obter a identificação de interligações adicionais entre nós da rede que possam ser estabelecidas a qualquer momento através da ativação de dispositivos de seccionamento, permitindo a reconfiguração da rede, de forma a garantir a maior disponibilidade possível.

1.2 Estrutura do documento

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma:

O capítulo 2 apresenta uma análise da bibliografia sobre o tema, primeiro explorando os conceitos de microrredes, fiabilidade e resiliência, e flexibilidade do consumo. Posteriormente, explora os processos de reconfiguração e os diferentes trabalhos que têm focado este tema, assim como os métodos de otimização que tipicamente são usados neste contexto. Finalmente, apresenta uma revisão sobre trabalhos de investigação que focam especificamente o mesmo tipo de objetivos.

O capítulo 3 apresenta a proposta de metodologia seguida ao longo desta dissertação, desde a forma de definição de uma rede para estudo e da obtenção de dados que a permitam caracterizar, culminando no processo de determinação da capacidade de subsistência que é depois usado no processo de análise de resiliência e no estudo de possibilidades de reconfiguração.

O capítulo 4 apresenta a rede escolhida para testar a metodologia e os resultados obtidos através dos métodos descritos no capítulo anterior, através da aplicação de análises com vários objetivos de otimização.

Por último, no capítulo 5 apresentam-se as considerações finais e tecem-se comentários a possíveis direções futuras de trabalho.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Microrredes de Distribuição de Energia Elétrica

As redes de distribuição existentes estão a crescer cada vez mais em complexidade, devido à necessidade de acompanhar o aumento da procura de energia e à existência de cargas mais sensíveis. Uma interrupção tem hoje em dia um impacto mais severo, quer devido à maior sensibilidade dos equipamentos eletrónicos aos transitórios associados, quer pela maior dependência da vida atual relativamente a este tipo de equipamentos. Este facto aliado à importância das estatísticas de qualidade de serviço, que têm impactos financeiros e na imagem das concessionárias das redes, reforça a preocupação com a avaliação da fiabilidade [7].

Depois de um desastre, um sistema de distribuição resiliente deve ser capaz de restaurar o serviço à carga crítica o mais rápido possível. A carga crítica geralmente inclui hospitais, iluminação pública, estações de água e outras infraestruturas que estão associadas às necessidades básicas da vida humana [3].

Resiliência é considerada "a capacidade de se preparar e se adaptar às mudanças nas condições e resistir e se recuperar rapidamente das interrupções. Para um sistema de distribuição, resiliência significa a capacidade de evitar danos graves à infraestrutura de distribuição causados por eventos extremos e restaurar o máximo de carga possível em um curto espaço de tempo após grandes interrupções [8].

A estabilidade das microrredes isoladas pode ser facilmente prejudicada por mudanças repentinas na carga ou geração se a geração de microrredes for dominada por RGDs renováveis, que são variáveis por natureza [4]. Assim, o seu controlo requer uma análise constante do trânsito de energia em diferentes cenários, nomeadamente na operação em ilha, para garantir que é mantida uma regulação de tensão adequada e para avaliar se o RGD pode lidar com os picos, por exemplo, durante as transições para ilha [5].

Espera-se que o maior impacto das microrredes seja no fornecimento de serviços elétricos de maior fiabilidade, e com melhor qualidade de energia para os clientes finais. Ao fornecerem formas de satisfação local das necessidades de energia, as microrredes também podem evitar custos significativos de reforço do restante sistema de distribuição [5].

Uma microrrede pode assim ser definida como um subconjunto da rede (normalmente em níveis de baixa e média tensão) que pode ser isolada e ainda fornecer, de forma coordenada e controlada, todos ou parte dos seus clientes durante emergências, aumentando intrinsecamente a resiliência do sistema [8–10].

Uma microrrede pode ajudar a restaurar o serviço de cargas críticas nos alimentadores de distribuição onde as fontes de alimentação não estão disponíveis ou não são suficientes [11]. A microrrede é reconectada ao alimentador de distribuição depois das zonas com falha serem isoladas e ser possível de novo garantir o fornecimento às cargas críticas a partir do alimentador [8].

A noção de controlo é central nas microrredes. Na verdade, o que distingue uma microrrede de um sistema de distribuição com RGDs é a sua controlabilidade, de forma que apareçam para a rede a montante como uma unidade controlada e coordenada [10].

O controlador independente da microrrede é o que lhe fornece a capacidade de operar conectada ou desconectada da rede principal, quando necessário. O controlador «da microrrede monitoriza o estado do ponto de acoplamento comum, onde a rede principal e a microrrede se conectam e isola a microrrede quando ocorre um distúrbio de energia, como por exemplo, uma falha na rede principal [4]. Existem duas questões que precisam ser resolvidas na operação da microrrede: controlo de tensão e equilíbrio de geração de frequência/carga [10].

2.2 Fiabilidade e Resiliência de redes elétricas

A fiabilidade está relacionada a eventos com alta probabilidade, mas um impacto relativamente baixo (como falhas no sistema de energia), enquanto a resiliência está relacionada a eventos com baixa probabilidade, mas de alto impacto (como furacões e tornados). A diferença entre fiabilidade e resiliência é demonstrada pela capacidade de sobrevivência dos sistemas de energia ao experimentar eventos extremos [12].

2.2.1 Fiabilidade

As políticas de fiabilidade atuais em sistemas de energia concentram-se principalmente em garantir a sua operação normal sob as contingências simples mais severas ou no máximo duas contingências, conhecidas como critérios $N - 1$ e $N - 2$. De acordo com Shi e Liu [2], muitos estudos académicos [13, 14] foram conduzidos para impor o balanço de potências, resolvendo vários problemas de escalonamento de unidades de geração com restrições de contingência de maneira centralizada, tendo mostrado que a extensão do problema a $N - k$, com $k > 2$, torna-se intratável devido ao peso computacional, resultando num problema de dimensão dada pela equação 2.1.

$$O = \sum_{i=1}^k \binom{N}{k} \quad (2.1)$$

A avaliação da fiabilidade é particularmente importante quando se pretende aumentar a penetração de sistemas de energia renovável e em particular de RGDs em sistemas elétricos. A fiabilidade no sistema elétrico descreve a capacidade do sistema ou componente de agir sob condições estabelecidas por um determinado período de tempo. Este aspeto do sistema é expresso como a probabilidade de falha, a frequência de falha ou expresso em termos de uma probabilidade derivada de fiabilidade, disponibilidade e capacidade de manutenção [15].

A fiabilidade historicamente tem sido avaliada por meio de critérios e índices determinísticos. No entanto, essas abordagens podem ser, e em muitos casos têm sido, substituídas por métodos probabilísticos que são capazes de responder aos fatores estocásticos que influenciam a fiabilidade do sistema [16].

Para avaliar a fiabilidade do sistema de distribuição, é comum usar dois tipos diferentes de técnicas, métodos de simulação de Monte Carlo e métodos analíticos [7]. O uso de métodos de Monte Carlo consiste, por exemplo, no estudo do impacto de diversos tempos de recuperação gerados de acordo com diferentes distribuições de probabilidade em termos de custo e energia não servida.

2.2.2 Resiliência

A resiliência, no contexto de sistemas de energia, refere-se à capacidade de um sistema de energia de se recuperar rapidamente após um evento disruptivo ou, mais genericamente, à capacidade de antecipar eventos extraordinários e de alto impacto e baixa probabilidade. A resiliência não é um conceito estático, mas é um procedimento dinâmico e contínuo para adaptar (e possivelmente transformar) a estrutura e o funcionamento dos sistemas elétricos para melhor prepará-los para choques externos imprevisíveis. Uma rede resiliente deve ser robusta e operacionalmente flexível, mas também deve possuir a capacidade de adaptação para planejar, facilitar e implementar as ações e medidas necessárias para a preparação de eventos semelhantes ou novos no futuro [9].

A resiliência da infraestrutura de energia elétrica é abordada através da identificação de componentes vulneráveis nas redes. As interrupções deliberadas não ocorrem com frequência, mas, quando acontecem, podem ser trágicas. A avaliação probabilística quantitativa de tais contingências de baixa probabilidade e alta consequência é muito desafiadora, exige recursos e está sujeita a imprecisões [17].

Quando as microrredes são usadas para restaurar a carga crítica após um evento extremo, várias questões técnicas devem ser abordadas, tais como, limites de recursos de geração e armazenamento de energia, restrições dinâmicas de unidades de geração e a estabilidade das microrredes em eventual funcionamento isolado assim como a interdependência de cargas [3].

Considera-se que as redes de energia integradas com um grande número de microrredes incorreriam em menos cortes de carga em condições extremas. Assim, as microrredes criticamente situadas e amplamente agregadas sustentariam o fornecimento de energia para cargas locais por meio de estratégias de *self-healing* e isolamento em ilha, o que pode melhorar a resiliência da rede elétrica dentro de intervalos de tempo especificados [12].

Geralmente, a resiliência das redes de energia pode ser estudada em dois níveis: nível de componente e nível de sistema [18]. Os estudos de nível de componente concentram-se principalmente em componentes físicos ou cibernéticos individuais numa rede de energia. Desenvolvimentos recentes no projeto e implementação de tais componentes melhoraram consideravelmente o seu desempenho e resiliência [19]. No entanto, a rede elétrica é composta por muitas partes, cujas interações são complexas e difíceis de calcular. A fim de capturar as interdependências físicas e cibernéticas desses componentes, os especialistas em energia fizeram grandes esforços para estudar a resiliência no nível do sistema [20]. De facto, vários investigadores descobriram que é mais vital estudar a resiliência macroscópica da rede elétrica do que dissecar a resiliência de um componente individual [19]. A definição de métricas de resiliência ao nível do sistema permite a sua análise a fim de tomar medidas preventivas e assim possuir formas eficazes de garantir o nível de resiliência desejado.

Um tipo de falhas que pode causar grandes distúrbios no sistema são a ocorrência de falhas em cascata [21], frequentemente causadas por falhas ocultas. Uma falha oculta é indetetável durante a operação normal, mas será exposta como uma consequência direta de outros distúrbios do sistema, o que pode fazer com que um sistema de proteções desative incorretamente e inadequadamente elementos do circuito.

2.3 Flexibilidade dos consumidores

Vários dispositivos de uso final tais como aquecedores de água, bombas de calor, carregadores de veículos elétricos, sistemas de armazenamento de energia, entre outros, podem ser tornados “flexíveis”, sofrendo ajustes na sua utilização em resposta a necessidades da rede, com um mínimo de transtorno para os utilizadores. A rede pode assim beneficiar desta flexibilidade, por exemplo para melhor aproveitar a variabilidade da geração baseada em recursos renováveis, ou para adiar ou evitar investimentos em expansão de capacidade, traduzindo-se assim em benefícios económicos¹.

¹<https://buildings.lbl.gov/demand-flexibility>

Uma das formas mais comuns de implementar a flexibilidade no consumo consiste nas ações de **Demand Response (DR)** ou resposta da procura. A **DR** é definida como um mecanismo de participação dos consumidores na gestão do sistema que é considerado um **RGD** [22] com grande potencial para melhorar a operação dos sistemas elétricos [23], sendo potenciado por outras melhorias que estão a ser implementadas em sistemas elétricos, como a instalação de contadores inteligentes [24, 25].

Lynch [26] define a resposta da procura como a capacidade dos consumidores ajustarem dinamicamente o seu consumo de energia elétrica em resposta a necessidades do sistema ou às condições do mercado (fig. 2.1). A **DR** é frequentemente proposta como um meio de reduzir a procura de energia elétrica na ponta de consumo, o que retira pressão ao mercado grossista de energia no curto prazo e a necessidade de investimento em capacidade de geração no longo prazo. Isso leva a poupanças de custos operacionais e de capital. A **DR** também é frequentemente citada como um meio potencial de mitigar os desafios de integração da geração renovável variável, permitindo reduzir a procura em momentos de baixa oferta renovável e aumentar quando há um excedente de energia renovável disponível.

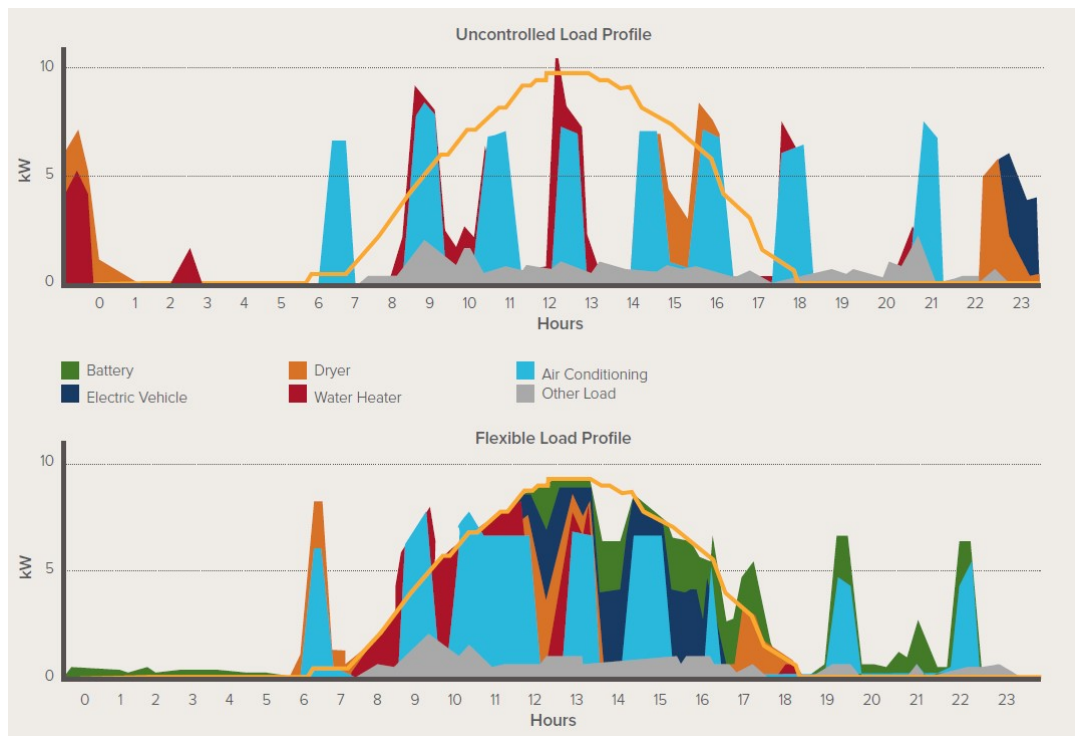


Figura 2.1: Ilustração do impacto da **DR** num perfil de carga residencial [27]

De acordo com o Departamento de Energia dos Estados Unidos, DR é “uma tarifa ou programa estabelecido para motivar mudanças no uso de eletricidade por consumidores finais, em resposta a mudanças no preço da eletricidade ao longo do tempo, ou para dar pagamentos de incentivos destinados a induzir redução uso de eletricidade em tempos de altos preços de mercado ou quando a fiabilidade da rede está comprometida” [28]. Existem principalmente dois agrupamentos de programas de DR [29]: DR baseado em preço e DR baseado em incentivos, com a principal diferença de que o primeiro oferece aos clientes preços variáveis ou localizados de eletricidade, enquanto o último concede pagamentos fixos ou variáveis no tempo em resposta a condições específicas [30].

O conceito e o papel da DR no fornecimento de reserva numa microrrede é muito importante, principalmente na presença de fontes renováveis. Os programas de DR são usados por concessionárias de redes elétricas para gerir o consumo de eletricidade do cliente em resposta às condições de fornecimento. A aplicação de programas DR em microrredes tem incluído intervenções sobre vários tipos de cargas em ambiente residencial, comercial e industrial [31–33].

Como exemplo, foi proposto em [34, 35] um esquema de preços em tempo real para gestão de carga residencial, que apresentavam um esquema automático otimizado para o funcionamento de cada eletrodoméstico em residências [36]. De forma idêntica, desde 2004, a *Bonneville Power Administration* (BPA)² implementou mais de duas dúzias de projetos DR com clientes. Estes projetos testaram um conjunto específico de produtos DR que usam diferentes tecnologias de controlo e comunicação, como sistemas de aquecimento de água, bombas de irrigação, cargas de serviços, e eletrodomésticos. Outros programas testaram termóstatos programáveis, controlo de tensão, controlo temporizado de aquecimento de água e armazenamento térmico.

As operadoras podem usar a DR como um mecanismo de gestão de carga, garantindo fiabilidade ou atenuando os picos de preços, incentivando os clientes a reduzir a procura de energia durante os períodos de pico (redução de pico) ou mudar a procura dos horários de pico para fora do pico (deslocamento de carga). Um estudo desenvolvido pela BPA [37] analisou 19 programas e produtos comuns de DR atualmente oferecidos por operadoras nos Estados Unidos da América, enquadrados em quatro categorias:

²bpa.gov/EE/Technology/demand-response/Pages/Demand-Response.aspx

- Controlo de carga direto.
- Preços variáveis com o tempo.
- Redução da procura.
- Redução automática da tensão ao utilizador final.

O mesmo relatório determinou um potencial de 2.295 MW de resposta da procura na temporada de inverno (15% da ponta de consumo prevista) e 2.415 MW de potencial no verão (18% da ponta).

A título de exemplo, um projeto piloto de grande escala liderado pela [BPA](#) e Energy Northwest forneceu até 35 MW de resposta da procura. Os recursos incluíram duas fábricas de celulose e papel juntamente com a redução da tensão em subestações e a atuação de um sistema de armazenamento de energia.

A contrapartida para os clientes neste tipo de iniciativas é a obtenção de descontos razoáveis nas faturas de energia em troca de alguma perda de qualidade de serviço sob a forma de pequenos cortes ou limitações no uso de equipamentos [38]. Formas de o materializar incluem, por exemplo, aquecedores de água, que são inerentemente capazes de armazenar e libertar energia térmica ao longo do tempo. Aquecedores de água com ligação à internet estão atualmente a ser testados com uma variedade de métodos e protocolos de comunicação, que vão desde redes Wi-Fi a redes móveis e sinais de rádio. Outros produtos residenciais, como termóstatos inteligentes e aquecedores de água, podem integrar-se nos programas de [DR](#) de várias maneiras, desde instigar mudanças comportamentais no uso de energia até reduzir a procura da rede por meio de recursos técnicos.

A integração de produtos residenciais com programas de resposta da procura pode, no entanto, ser afetada por questões de privacidade que representam possíveis obstáculos à aceitação e participação do consumidor.

Os contadores inteligentes e as infraestruturas de suporte são vitais para a implementação de estratégias de [DR](#). Os contadores inteligentes possuem a capacidade de comunicação bidirecional entre o utilizador final e a distribuidora. Para atividades de [DR](#), os contadores inteligentes podem receber sinais da distribuidora, como limites de consumo de energia e de potência num determinado período (por exemplo, para reduzir a carga de um transformador local) ou sinais de preços determinados de forma dinâmica [39].

Em todo o mundo, desenvolvem-se esforços para padronizar os aspectos operacionais das redes inteligentes, nomeadamente relacionados com DR. Como exemplo, o [Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia \(NIST\)](#) dos Estados Unidos está a criar uma estrutura regulatória para desenvolver padrões comuns de interoperabilidade de redes inteligentes, envolvendo partes interessadas e parceiros da indústria, governo e academia.

Em termos de distribuição mundial, a América do Norte tem sido a região líder no mercado de capacidade de DR, respondendo por mais de 80% da participação no mercado global em 2013, seguida pela Europa e Ásia-Pacífico. Assim, a análise de exemplos de DR na América do Norte é significativamente útil para observar as tendências no setor. A Europa ocupa o segundo lugar e os países da União Europeia recentemente demonstraram interesse em ocupar uma porção mais ampla do mercado de DR no futuro [39].

2.4 Reconfiguração de redes de distribuição

As redes de distribuição de energia elétrica são normalmente exploradas de forma radial, existindo por isso, normalmente, apenas um caminho para o trânsito de energia. Contudo, é habitual possuírem algumas ligações adicionais que permitem fechar malhas através de seccionadores normalmente abertos, possuindo igualmente alguns dos troços ligados através de seccionadores normalmente fechados, para em caso de necessidade alterar a topologia, redirecionando trânsitos de modo a garantir a recuperação de cargas em situação de falha de algum troço, ou para balancear cargas entre alimentadores (fig. 2.2). As combinações possíveis de estados aberto/fechado para esses seccionadores que mantém a rede numa configuração radial constituem configurações alternativas para a exploração da rede [40, 41].

Uma operação otimizada de sistemas de distribuição de energia radial pode ser alcançada usando técnicas de reconfiguração. É possível atingir metas como a redução de perdas, o balanceamento de carga, a estabilidade de tensão, e a fiabilidade em condições normais de operação. Ao longo dos anos, muitas abordagens foram propostas com este propósito, utilizando diferentes técnicas de otimização, por ex. algum tipo de heurística, programação matemática ou técnicas aproximadas [41, 43].

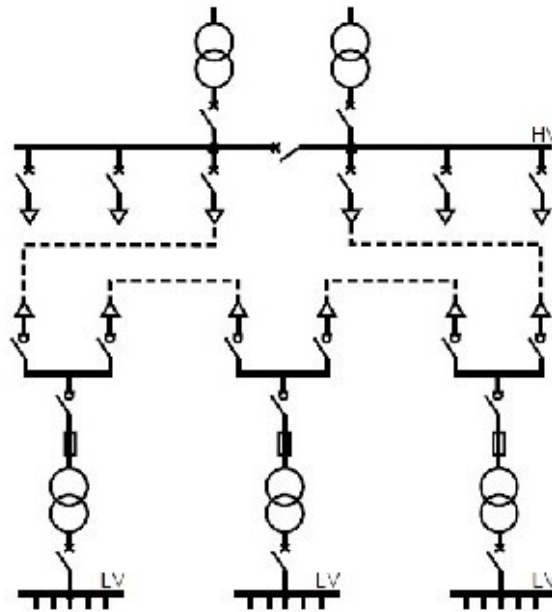


Figura 2.2: Secção de rede com possibilidade de reconfiguração [42]

A redução de perdas de energia decorre do balanceamento de carga, se for garantido que os troços de rede com maiores trânsitos são os de menor resistência. A estabilidade de tensão resulta de uma adaptação idêntica relativamente aos trânsitos de potência reativa. A fiabilidade pode ser melhorada se a recuperação de cargas e da própria rede em situações de contingência for facilitada pela reconfiguração [44–46].

Dado que a radialidade da rede deve ser mantida a fim de atender aos requisitos de proteção, o problema de conseguir simultaneamente uma redução real das perdas através da alteração da estrutura da rede tem despertado considerável interesse nos investigadores [47, 48].

A reconfiguração de uma rede de distribuição com geradores distribuídos num cenário de microrrede é também uma tarefa especialmente desafiante, pois essas fontes são altamente intermitentes, o que aumenta a complexidade da escolha da melhor configuração que tende a mudar de forma muito dinâmica, constituindo igualmente um alvo atual de investigação [47–49].

2.5 Métodos de Otimização em sistemas de energia

O planeamento e operação eficiente de sistemas de energia é importante para um fornecimento fiável e sustentável de energia. Por este motivo, a aplicação de técnicas de otimização tem sido um facto quase sempre presente na pesquisa constante por eficiência técnica e económica [50].

Neste contexto, os problemas associados à exploração e planeamento de sistemas elétricos de energia são normalmente problemas de otimização não-linear com um elevado grau de complexidade que representam um grande desafio para todas as abordagens ou métodos conhecidos. Podem exemplificar-se problemas, tais como despacho ótimo, escalonamento, expansão, localização de centrais e de traçados de linhas, colocação de compensação de energia reativa, etc.

O planeamento de sistemas elétricos de energia é igualmente, por natureza, um problema de otimização multi-objetivo que envolve diferentes perspetivas associadas a cada parte ou agente interessado. Um único agente pode também ter vários objetivos que precisam de ser otimizados simultaneamente. Estes problemas de sistemas de energia são normalmente grandes pelos padrões da maioria dos métodos de otimização [50].

Os problemas de otimização têm assim objetivos que precisam de ser minimizados (por exemplo, custos, perda de energia, erros, etc.) ou maximizados (por exemplo, lucro, qualidade, eficiência, etc.), sujeitos a alguns constrangimentos. O problema é considerado de objetivo único se apenas uma função objetivo for otimizada. Em contrapartida, os problemas de otimização multi-objetivo requerem a otimização simultânea de várias funções objetivo [50], requerendo do decisor o estabelecimento de compromissos. A otimização sob incerteza e multi-objetivo produzem análises aprofundadas e permitem que um decisor tome uma decisão final a partir de vários pontos de vista [51].

Dificuldades acrescidas devem-se à natureza combinatória dos próprios processos, que normalmente leva a um aumento exponencial do número de alternativas a analisar, mesmo para sistemas não muito grandes. Por este motivo, é frequentemente necessário aplicar métodos mais eficientes mesmo que menos exatos, métodos que permitem uma modelação precisa do problema de otimização e procuram boas soluções para problemas muito complexos, dentro de um tempo computacional razoável [50].

Os algoritmos de otimização podem ser exatos ou não exatos. Os algoritmos exatos encontram um ótimo global, mas normalmente não escalam eficientemente para grandes problemas. Em contrapartida, os algoritmos não exatos podem garantir ou não a obtenção de um determinado nível de qualidade da solução, mas fazem-no de forma eficiente e em tempo útil. Entre os não-exatos, os que garantem uma solução ótima são chamados algoritmos de aproximação e os outros denominam-se heurísticas.

No caso concreto da otimização combinatória, o número normalmente muito elevado de soluções discretas possíveis torna a resolução do problema através de algoritmos, e mesmo de aproximações, muito morosa e até impraticável do ponto de vista do esforço computacional. O objetivo principal passa a ser assim, a resolução do problema obtendo soluções de “boa qualidade” mas sem a garantia de obter a solução ótima, num tempo computacional “aceitável”, o que pode ser atingido através de uma heurística [52]. Para contornar as limitações das heurísticas que normalmente são criadas para resolver problemas específicos, as meta-heurísticas foram desenvolvidas com o objetivo de constituírem técnicas suficientemente gerais para serem aplicáveis à maior parte dos problemas combinatórios.

As principais meta-heurísticas são descritas brevemente abaixo [50, 53].

- Algoritmos genéticos [54]: Os algoritmos genéticos são métodos de pesquisa probabilísticos inspirados nos princípios da seleção natural e da genética. Foram desenvolvidos na Universidade do Michigan durante os anos 1960, tendo como objetivos o estudo dos mecanismos de adaptação existentes na natureza e o desenvolvimento de modelos computacionais que retivessem os princípios básicos identificados nos sistemas naturais. Estes algoritmos processam conjuntos de elementos do espaço de procura (potenciais soluções para o problema) usualmente denominados populações, que são transformados (evoluídos) ao longo de sucessivas iterações (gerações). O objetivo é encontrar uma solução de qualidade elevada.
- *Simulated Annealing* [55]: É uma meta-heurística inspirada no processo físico de recozimento de um sólido para obtenção de estados de baixa energia na área da física da matéria condensada. Assim como o recozimento procura levar a matéria para um estado de energia mínima, a otimização consiste em encontrar uma solução que minimize uma determinada função objetivo,

através de um processo de pesquisa direcional que ocasionalmente aceita degradar a melhor solução atingida até ao momento para poder explorar outros caminhos possíveis, procurando evitar o bloqueio em ótimos locais.

- *Particle Swarm* [56]: O *Particle Swarm* é baseado em movimentos de grupos de aves e peixes. Neste algoritmo, uma série de entidades simples — as partículas — são colocadas no espaço de pesquisa de um problema ou função, e cada uma avalia a função objetivo na sua localização atual. Posteriormente, cada partícula determina o seu movimento através do espaço de pesquisa, combinando alguns aspetos do histórico dos seus melhores locais atuais com os de um ou mais membros do enxame, com algumas perturbações aleatórias. A próxima iteração ocorre depois de todas as partículas terem sido movidas. Eventualmente, o enxame mover-se-á como um todo, como um bando de aves que procuram comida coletivamente, tornando provável que se aproxime de um ideal da função de avaliação.
- *Tabu Search* [57]: Este algoritmo surgiu como uma técnica para guiar uma heurística de pesquisa local tradicional na exploração do espaço de soluções além do ótimo local, usando para isso basicamente estruturas de memória que guardam nomeadamente a lista dos últimos movimentos proibidos (lista *tabu*). É uma das meta-heurísticas mais usadas e o seu sucesso decorre da sua eficiência em produzir soluções de alta qualidade para vários problemas combinatórios.
- Colónia de Formigas [58]: É um método de pesquisa construtivo baseado no comportamento das formigas, no qual uma população de agentes constroem cooperativamente soluções candidatas para um dado problema. A construção é probabilística, guiada pela heurística do problema e por uma memória compartilhada entre os agentes, contendo a experiência de iterações anteriores. Esta memória consiste numa trilha artificial de feromonas, baseada na atribuição de pesos às variáveis das soluções candidatas. As variáveis do problema podem ser representadas por matrizes/ grafos contendo os valores da sua informação heurística.

- Algoritmos Híbridos [59]: Estas meta-heurísticas combinam algoritmos com técnica simples de pesquisa local com algoritmos que apresentam propriedades complementares como a evolução diferencial, sistemas imunológicos artificiais, enxames de partículas e algoritmos genéticos.

2.6 Estado da arte

Esta secção pretende fazer uma breve síntese de publicações científicas recentes relacionados com o objetivo específico deste trabalho, a procura pela melhoria da resiliência em microrredes tirando partido da flexibilidade oferecida pelos consumidores e fazendo uso das possibilidades de reconfiguração.

Alireza Majzoobi e Amin Khodaei [60] estudaram a aplicação de microrredes para apoiar a flexibilidade da rede de distribuição. Para esse efeito, propuseram um modelo de escalonamento ótimo na microrrede orientado para aproveitar a flexibilidade através da coordenação das cargas de consumidores/prosumidores com foco na capacidade de adaptação, utilizando um modelo de programação linear inteira mista.

Good e Mancarella [61] apresentaram um modelo de programação linear inteira mista estocástica para garantir o balanço de energia e reservas numa comunidade energética, tendo em consideração as restrições locais da rede. A formulação proposta permite uma modelação extensiva das diferentes opções de flexibilidade, nomeadamente, armazenamento energético de vários tipos, substituição de vetores, corte seletivo de cargas e manipulação do fator de potência.

Guo et al. [62] propuseram um modelo estocástico orientado à resiliência de uma comunidade energética considerando o uso de resposta da procura. A proposta inclui um modelo estocástico de otimização com restrições, de dois níveis, com o objetivo de combinar portefólios com a minimização do custo do pior caso possível em situação de desastre. Os autores aplicaram o modelo a um parque industrial em desenvolvimento com múltiplas fontes energéticas complementares, localizado na região de Wujin, na China.

Zakariazadeh et al. desenvolveram um novo método estocástico de programação de energia e reserva para uma microrrede que considera vários tipos de programas de resposta da procura [38]. Na abordagem proposta, todos os tipos de clientes, residenciais, comerciais ou industriais, podem participar em programas

de resposta da procura que serão considerados na programação de energia ou reserva. Os resultados demonstraram que a adoção deste tipo de programas pode reduzir os custos totais de operação de uma microrrede e determinar um uso mais eficiente dos recursos energéticos.

Jahani et al. [63] aplicaram um modelo multi-objetivo de otimização para a reconfiguração ótima de um sistema de distribuição com os objetivos de melhorar a fiabilidade e diminuir as perdas na rede de distribuição. A reconfiguração ótima da rede permite melhorar o desempenho do sistema, considerando os objetivos conflituais de minimização de perdas e melhoria da fiabilidade. O modelo de programação estocástica escolhido permite modelar a natureza estocástica dos parâmetros de distribuição. A gestão da procura é contemplada como forma de mitigar as perdas de energia e melhorar a fiabilidade.

Manshadi e Khodayar [17] consideram que as crescentes preocupações com a fiabilidade e qualidade do serviço nas redes de distribuição de energia promovem o conceito de microrredes portadoras de energia múltiplas. A microrrede portadora de energia múltipla é referida como uma rede de distribuição de eletricidade e uma rede de distribuição de gás natural, interligadas, na qual a rede elétrica é composta por um grupo de cargas interligadas e unidades de geração distribuída, representando uma única entidade controlável dentro da rede elétrica com a capacidade de operar em modo interligado e em modo de ilha. Os autores utilizaram uma metodologia para identificar os componentes vulneráveis, e assegurar a operação resiliente e coordenada das infraestruturas de gás e eletricidade.

Vários autores abordam as contingências como consequência de ameaças em sistemas de energia [64–68]. São consideradas contingências em resultado de desastres naturais, ou de ataques físicos ou cibernéticos, os quais extinguiriam os principais elementos da infraestrutura de eletricidade, podendo levar a *blackouts* (colapso do sistema) [17]. As interrupções no fornecimento de energia em redes de energia elétrica causadas por ataques físicos são tratadas em [65], que utiliza um problema de programação inteira mista de dois níveis, resolvido através de uma abordagem heurística. Um modelo para proteger a rede de energia contra uma série de cenários que levam à interrupção no fornecimento de energia e apagões é desenvolvido em [66].

Shi e Liu focam o problema de como evitar a ocorrência de falhas em cascata através de um corte seletivo de cargas, considerando os custos de rejeição heterogêneos dos consumidores participantes num esquema de DR. Os autores propuseram um algoritmo de rejeição de carga justo para resolver o problema de forma descentralizada, requerendo apenas a monitorização do estado operacional do participante e a interação com os seus vizinhos [2]. O algoritmo usado pode determinar um preço marginal de compensação para cada participante em tempo real mesmo sem conhecer os custos associados ao corte de cargas de todos os restantes tipos de consumidor.

Saleh et al. [4] propõem usar a infraestrutura da rede de distribuição existente, se aplicável, durante os *blackouts* para formar *clusters* de microrrede, a fim de aumentar a segurança do fornecimento e melhorar a estabilidade do sistema. A ligação de múltiplas microrredes, durante um *blackout*, é possível com a ligação especial dos alimentadores de distribuição, especialmente porque as infraestruturas de distribuição são tipicamente subterrâneas e, portanto, são intrinsecamente menos suscetíveis a danos do que as linhas de transmissão, durante desastres naturais. Foi usada simulação dinâmica para testar a capacidade de subsistência de microrredes isoladas após um blackout, que são interligadas para formar um *cluster*. As conclusões referem que se os geradores existentes nas microrredes possuírem baixa inércia, estes tenderão a oscilar em consequência das comutações e poderão levar à instabilidade do *cluster*.

Gao et al. propõe um método de restauração de serviço que usa microrredes com recursos de geração limitados para atender a carga crítica em alimentadores de distribuição após um evento extremo [3]. Considerando a escassez de recursos de geração de energia, o conceito de tempo de operação contínua é introduzido para determinar a disponibilidade de microrredes para restauração de carga crítica e para avaliar o tempo de serviço. O método usado baseia-se em cadeias de Markov para avaliar o tempo de operação contínua e numa heurística para proceder à recuperação de serviço que consiste no uso de uma tabela estratégica que guarda as possíveis sequências de recuperação e um modelo de programação linear que seleciona as sequências a partir dessa tabela.

Hasanpour et al. [48] usaram uma abordagem baseada no algoritmo de pesquisa *Cuco Search* para determinar a configuração ideal de uma rede com base na simulação de 24 horas, considerando a variação horária de três tipos de carga, residencial, industrial e comercial. A abordagem procurou simultaneamente por reduzir as perdas de energia e melhorar o perfil de tensão numa rede padrão IEEE 33 barramentos. Os resultados da simulação mostraram a eficácia do método proposto, tendo sido implementados em ambiente de software MATLAB.

Por sua vez, Khederzadeh e Beiranvand [69] apresentaram um novo método para modelar e lidar com as falhas em cascata numa microrrede autónoma, a fim de a proteger contra riscos que podem levar ao seu colapso total. Utilizaram um algoritmo genético para encontrar a configuração ideal da microrrede com linhas menos vulneráveis. A eficácia do método proposto foi investigada usando também a rede padrão IEEE 33 barramentos.

Finalmente, Bawayan e Younis [70] propuseram um novo esquema para contenção de falhas em cascata. Este esquema emprega fluxo de potência e otimização de reconfiguração de topologia para evitar a propagação de falhas e permitir que a microrrede sustente a sua operação. A otimização da topologia foi formulada como um programa linear inteiro para minimizar o índice máximo de estabilidade da linha. A formulação também levou em consideração as restrições operacionais do sistema. A validação foi realizada através da simulação do sistema IEEE 33 barramentos como uma microrrede em ilha.

PROPOSTA DE METODOLOGIA

Neste capítulo descreve-se a metodologia proposta para alcançar o objetivo de estudar a resiliência de uma microrrede, e que começa precisamente pela forma de definição de uma rede para estudo, referindo as suas características e os dados necessários. A segunda secção aborda explicitamente esta última questão, nomeadamente sobre a forma de obter os dados necessários para estudar a contribuição da flexibilidade do consumo para garantir a resiliência da rede e que pressupõe conhecer a parcela de carga em cada instante que pode ser sujeita a ações de controlo de forma a responder a necessidades da gestão da rede. Seguidamente define-se a forma como se propõe avaliar a capacidade de subsistência de uma microrrede a eventos, nomeadamente a cortes nas linhas que a compõem, através da determinação do tempo máximo de indisponibilidade das cargas que alimenta. A forma proposta para estudar como aumentar a resiliência de uma microrrede através de reconfiguração e uso da flexibilidade é depois descrita como a aplicação de um algoritmo de otimização, primeiro numa abordagem mono-objetivo que procura minimizar o tempo de indisponibilidade e posteriormente numa abordagem multi-objetivo para a qual se definiram igualmente formas de avaliar o custo associado à instalação de novas interligações assim como a energia não fornecida às cargas resultante quer do corte de alimentação quer da contribuição da flexibilidade para a resiliência. O conjunto de rotinas desenvolvido para implementar a metodologia proposta está documentado no anexo [II](#).

3.1 Definição de uma rede para estudo

O objetivo do trabalho é estudar a resiliência de uma microrrede composta por um alimentador de distribuição em baixa tensão. Este tipo de redes é normalmente estruturado de forma radial, sendo composto portanto por troços de linha que interligam diversos nós, cada um dos quais pode possuir carga e produção, sem que em funcionamento se formem malhas, pelo que a energia só possui um caminho possível.

As redes elétricas tem sido alvo de diversos estudos, existindo assim diversos modelos na bibliografia, embora tipicamente focando redes de média e alta tensão, sendo disponibilizados dados sobre a topologia e a impedância das linhas, assim como das potências de geração e carga em cada nó para uma situação específica de análise, nomeadamente o caso mais grave. Exemplos incluem as redes IEEE padrão, como a rede IEEE de 30 barramentos ilustrada na figura 3.1¹.

Para desenvolver o estudo pretendido, que pressupõe uma análise temporal a fim de perceber a resiliência da rede, propõe-se estudar a rede com base na atribuição de séries temporais de valores às potências de geração e consumo em cada nó que representem situações realistas, para as quais seja possível determinar se a microrrede isolada resultante do corte de um ou mais troços do alimentador é capaz de subsistir, recorrendo apenas à capacidade de geração própria e à atuação de sistemas de controlo de cargas.

¹http://labs.ece.uw.edu/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm

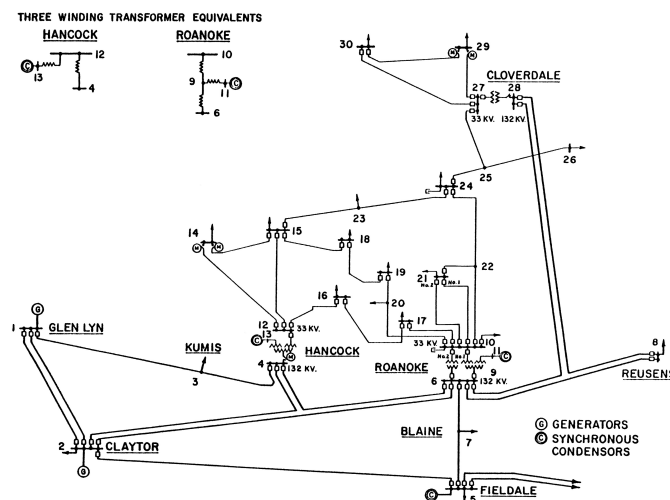


Figura 3.1: Exemplo de uma rede padrão IEEE de 30 barramentos

3.2 Obtenção de dados de consumo e flexibilidade

Para poder estudar as possibilidades que o uso da flexibilidade oferece para a gestão de uma rede, torna-se necessário obter dados sobre o consumo que permitam não só caracterizar a potência pedida em cada nó da rede em cada instante, como determinar a quantidade consumida em cargas passíveis de controlo que possam ser desviadas ou interrompidas em caso de necessidade, sem comprometer os serviços essenciais. Para esse fim, dado que não existem normalmente diagramas de consumo de equipamentos que possam ser usados para flexibilidade, foi decidido usar-se o modelo doméstico de consumo de eletricidade de Richardson [71].

O modelo de Richardson apresenta um método minucioso e detalhado para gerar dados de ocupação realistas para as famílias do Reino Unido, com base em dados de utilização do tempo inquiridos que descrevem o que as pessoas fazem e quando. A abordagem apresentada gera dados estatísticos de séries de tempo de ocupação numa resolução de dez minutos e tem em conta as diferenças entre os dias úteis e os fins de semana. O modelo indica ainda o número de ocupantes que estão ativos dentro de uma casa num dado momento, o que é importante, por exemplo, para modelar a partilha de energia (uso partilhado de aparelhos, etc.) Os dados do modelo podem ser usados como entrada para qualquer modelo de energia doméstica que utilize séries temporais de ocupação como variável base, ou qualquer outra aplicação que exija dados de ocupação detalhados. O modelo foi implementado no Excel e está disponível gratuitamente.

A folha de cálculo mencionada acima permite especificar o número de ocupantes da habitação, se é dia útil ou não, selecionar o mês pretendido, e alocar aleatoriamente os equipamentos ou especificar manualmente que equipamentos se devem considerar ativos (fig. 3.2). Após a introdução destes dados, é possível executar uma simulação do diagrama de ocupação, obtendo-se um modelo de consumo de energia (fig. 3.3). Através da especificação de equipamentos e do número de ocupantes é possível gerar diagramas de cargas para habitações de vários tipos e tamanhos diversos. Assim pode considerar-se, por exemplo, para uma moradia, um maior número de ocupantes e maior quantidade de equipamentos, incluindo de carácter flexível.

CAPÍTULO 3. PROPOSTA DE METODOLOGIA

Steps:			
1 Specify the number of residents in the house:	2	(Specify 1 to 5)	
2 Specify either a weekday (wd) or weekend (we):	wd	(Specify 'wd' or 'we')	
3 Select the month of the year:	2	(Specify 1 to 12)	
4 Randomly allocate appliances to the dwelling (or manually specify these on sheet 'appliances')	Allocate appliances to the dwelling		
5 Run the active occupancy model	Run the occupancy simulation		
6 Run the electricity demand simulation (including both the lighting and appliance models)	Run the electricity demand model		

urs)

Appliance category	Appliance type	Dwelling configuration
		Has appliance?
		Randomise
Cold	Chest freezer	NO
	Fridge freezer	YES
	Refrigerator	YES
	Upright freezer	NO
Consumer Electronics + ICT	Answer machine	YES
	Cassette / CD Player	YES
	Clock	YES
	Cordless telephone	YES
	Hi-Fi	YES
	Iron	YES
	Vacuum	YES
	Fax	NO
	Personal computer	NO
	Printer	YES
	TV 1	YES
	TV 2	YES
	TV 3	YES
	VCR / DVD	YES
	TV Receiver box	YES
Cooking	Hob	YES
	Oven	NO
	Microwave	YES
	Kettle	YES
Wet	Small cooking (group)	YES
	Dish washer	YES
	Tumble dryer	NO
	Washing machine	YES
Water heating	Washer dryer	YES
	DESWH	NO
	E-INST	NO
	Electric shower	YES
Electric Space Heating	Storage heaters	NO
	Other electric space heating	NO
Lighting	Lighting	YES

Figura 3.2: Entrada de dados para o modelo de Richardson [71]

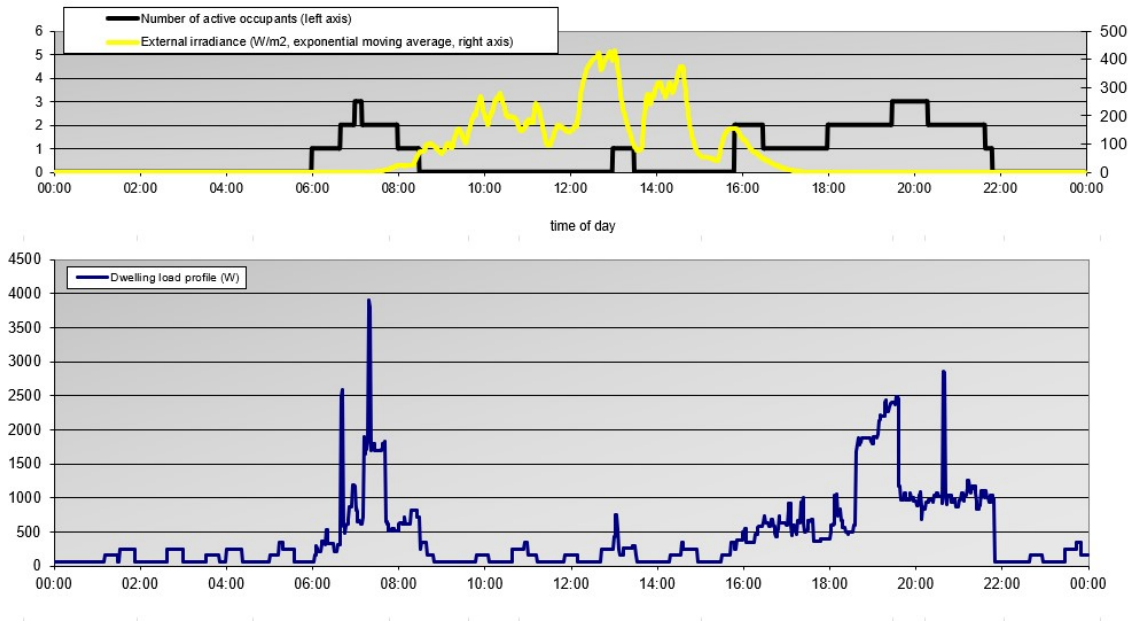


Figura 3.3: Exemplo de diagramas resultantes do modelo de Richardson [71]

3.3 Determinação da capacidade de subsistência de uma sub-rede

Para analisar a resiliência da rede é naturalmente necessário um indicador que permita medir esta resiliência e que possa ser usado para testar diferentes soluções. A resiliência da rede pode, por exemplo, ser medida pelo menor tempo de disponibilidade que oferece a cada uma das suas cargas, critério que se desejaria maximizar, ou, de forma complementar, pelo máximo tempo de indisponibilidade a que sujeita as suas cargas, opção que se considerou preferível para melhor compatibilização com a formulação convencional dos algoritmos de otimização.

Propõe-se assim determinar a capacidade de subsistência da rede, para um determinado período de tempo em análise. Sendo $P_i(\Delta t) = P_{Di}(\Delta t) - P_{Gi}(\Delta t)$ a potência pedida num nó i para um dado instante, $P_{Di}(\Delta t)$ a potência pedida pelas cargas, e $P_{Gi}(\Delta t)$ a potência potencialmente fornecida pelas unidades de geração ligadas a esse nó, a potência pedida por uma dada sub-rede com N nós, $P_{grid}(\Delta t)$, é assim calculada através da equação 3.1.

$$P_{\text{grid}}(\Delta t) = \sum_i^N P_i(\Delta t) \quad (3.1)$$

Se $P_{\text{grid}}(\Delta t) < 0$, considera-se que a potência que pode ser gerada no interior da sub-rede excede as necessidades da própria rede. Se $P_{\text{grid}}(\Delta t) > 0$ então a rede só poderá subsistir se for possível cortar cargas através do uso da flexibilidade do consumo.

Assim, o tempo T_I em que qualquer uma das suas sub-redes pode ficar indisponível é calculado através da equação 3.2, sendo $P_{\text{flex}}(\Delta t)$ a potência disponível em cargas flexíveis em cada período de duração Δt .

$$T_I = \sum_{P_{\text{grid}}(\Delta t) > P_{\text{flex}}(\Delta t)} \Delta t \quad (3.2)$$

Abaixo apresenta-se o código de uma função *indisponibilidade*, em MATLAB, que efetua o cálculo de acordo com a equação 3.2, tendo como argumentos a matriz de diagramas de potência pedida em cada nó (d_{cargas}) e a matriz de diagramas de carga flexível em cada nó (p_{plex}).

```
function minutos = indisponibilidade (d_cargas, p_flex)
    periodos = size(d_cargas,2)-1;
    minutos = 0;
    (...)
    for periodo=1:periodos
        carga= [d_cargas(:,1),d_cargas(:,periodo+1)];
        Pin = sum(carga(:,2));
        flex_total = sum(p_flex(:,periodo+1));
        if Pin> flex_total
            minutos = minutos + 1;
        end
    end
end
```

3.4 Análise da resiliência da rede em caso de falha de um troço

Sendo a rede radial, o corte de um troço origina necessariamente duas sub-redes, uma que permanece ligada ao alimentador e outra que fica isolada. É esta última que deverá ser testada no sentido de avaliar se a geração nela contida é suficiente para alimentar as cargas durante um determinado período de tempo em análise. Estando definido na secção 3.3 o cálculo do tempo de indisponibilidade, a análise da resiliência passará assim pela determinação do tempo máximo de indisponibilidade das sub-redes resultantes do corte de um ou mais troços da rede original.

A rede constitui um grafo composto por um conjunto de nós interligados por troços, existindo diversos algoritmos desenvolvidos para resolver problemas modelados desta forma, nomeadamente problemas de caminho mais curto, problemas de árvore, ou problemas de interligação. Para o caso em estudo, optou-se por usar algoritmos de interligação para determinar as sub-redes resultantes.

Para esse efeito, tendo-se escolhido o MATLAB como ferramenta de suporte para este estudo, aproveitou-se o conjunto de funções que este software possui para criar e manipular grafos², assim como para explorar as suas potencialidades, nomeadamente a determinação de componentes ligados ou a determinação de caminhos mais curtos. Assim, em primeiro lugar, cria-se um grafo correspondente à rede original, a que seguidamente é retirado um ou mais troços, utilizando as funções correspondentes.

Para a análise de resiliência utiliza-se a função *conncomp* do MATLAB que determina os nós interligados num grafo, para identificar todas as sub-redes existentes, nomeadamente as não ligadas ao alimentador. A medida de resiliência será então dada pelo tempo máximo de indisponibilidade de todas as sub-redes geradas com todas as combinações de troços cortados numa dada análise. A função *estuda_subrede* representada abaixo cria um grafo a partir da descrição dos troços, retira uma lista de arestas do grafo (à partida uma ou duas) e determina as sub-redes ligadas, etiquetando os nós correspondentes.

²<https://www.mathworks.com/help/matlab/math/directed-and-undirected-graphs.html>

```

function minutos = estuda_subrede(trocos, d_cargas, edge, p_flexivel)
    minutos=0;
    uso_flexivel=0;
    ens=0;
    g = graph(trocos(:,1),trocos(:,2),trocos(:,3));
    for j=1:max(size(edge))
        g_result = rmedge(g,trocos(edge(j),1),trocos(edge(j),2));
    end
    subredes= conncomp(g_result);
    (...)
end

```

Dado que, para uma rede com M troços, o número de possibilidades em estudo é dado através da expressão 3.3, sendo C o número de troços a cortar em simultâneo, propõe-se apenas a possibilidade de estudar um máximo de dois cortes simultâneos para manter o número de combinações num limite aceitável, coincidindo assim com a análise de contingências $N - 2$ que é normalmente considerada o limite, como referido na secção 2.2.

$$N_{\text{poss}} = \frac{M!}{(M - C)!} \quad (3.3)$$

3.5 Reconfiguração da rede

Uma das possibilidades para melhorar a resiliência de uma rede radial consiste em criar interligações adicionais com seccionadores normalmente abertos que podem ser fechados em caso de necessidade, permitindo a compensação de cortes na rede através da criação de caminhos alternativos para o trânsito de energia.

Não sendo óbvia a identificação de quais as ligações que podem proporcionar melhor resultado, torna-se necessário conceber um processo de procura que as permita determinar. Contudo, numa rede radial com N nós e M troços podem criar-se um número de novas interligações de acordo com a equação 3.4).

$$N_{\text{comb}} = \binom{N}{2} - M = \frac{N(N - 1)}{2} - M \quad (3.4)$$

A consideração de m troços adicionais resulta num número de possibilidades dado pela equação 3.5, um número extremamente elevado mesmo para uma rede de pequena dimensão, caso se considerem um número de troços adicionais com significado.

$$N_{\text{poss}} = \frac{N_{\text{comb}}!}{(N_{\text{comb}} - m)!} \quad (3.5)$$

A título de exemplo, no caso de uma rede com 18 nós e 17 troços, um troço adicional corresponde a $153 - 17 = 136$ hipóteses a testar, mas dois troços adicionais correspondem a $136 \times 135 = 18360$ hipóteses, e três troços adicionais correspondem a $136 \times 135 \times 134 = 2460240$ hipóteses. Dado que cada análise implica tempo de cálculo, o teste de todas as possibilidades torna-se assim inviável. Uma hipótese de solução deste problema consiste na utilização de métodos de procura que utilizam heurísticas, normalmente utilizados em processos de otimização de problemas de natureza combinatoria, tal como descrito na secção 2.5, tendo-se optado por experimentar o método *Simulated Annealing*.

3.5.1 Representação de uma solução

O primeiro passo para implementar quer uma pesquisa sistemática de todas as opções possíveis, quer uma abordagem meta-heurística, é a definição de como representar uma hipótese ou solução. Neste caso optou-se por considerar uma solução representada por um vetor com os pares de nós correspondentes a cada troço adicional a considerar, num número entre um par e n pares correspondentes a um limite imposto, como representado abaixo. Só se admite a possibilidade de adicionar pares de nós não idênticos, correspondentes a troços não pré existentes e não duplicados na própria solução.

2	8	3	7		
---	---	---	---	--	--

A avaliação desta solução consiste assim em testar a resiliência da rede resultante da inserção dos troços nela indicados na rede original. Embora essa rede resultante seja na prática uma rede com malhas, é representativa das possibilidades alternativas de alimentar cada nó através de reconfiguração dos seccionadores que permitem abrir ou fechar os troços adicionais.

3.5.2 Algoritmo *Simulated Annealing*

Tal como introduzido na secção 2.5, o *simulated annealing* é uma meta-heurística inspirada no processo físico de cristalização de metais. Este processo consiste em aquecer o sólido até atingir a sua temperatura de fusão para que a matéria passe do estado sólido para o estado líquido, e posteriormente a temperatura deve ser lentamente diminuída para evitar instabilidade ao levar a matéria ao estado cristalino, ou seja, de energia mínima [53]. De forma análoga, no *simulated annealing* procura-se otimizar uma função objetivo que assim representa a energia da matéria, num processo que se baseia na aplicação de uma perturbação como mecanismo de geração de um novo estado, na tentativa de ir aproximando a solução. Tal como no processo emulado existem reaquecimentos para evitar parar em estados intermédios de energia, no *simulated annealing* aceita-se ocasionalmente degradar a função objetivo de acordo com uma probabilidade que se vai reduzindo ao longo do tempo, como a temperatura do processo original, e que neste caso procura evitar bloquear o processo em ótimos locais.

Um dos elementos chave da implementação de *simulated annealing* consiste na função de vizinhança ou de pesquisa local, que a partir de uma dada solução, deverá devolver outra ligeiramente diferente.

Neste trabalho optou-se por implementar esta função atribuindo igual probabilidade às seguintes hipóteses:

1. acrescentar um troço se a solução inicial não tiver já o número limite;
2. remover um troço se a solução inicial tiver mais do que um;
3. alterar aleatoriamente um dos troços da solução inicial.

A função é repetida caso as limitações indicadas nos pontos 1 a 3 não permitam a sua conclusão.

O algoritmo *simulated annealing* usa a pesquisa local para determinar novas soluções, que são sucessivamente comparadas com a “melhor” obtida até ao momento, porém, aceitando de vez em quando degradar a solução, de acordo com uma probabilidade decrescente, de forma a mitigar a possibilidade de bloqueio em ótimos locais. A probabilidade de aceitação de uma solução pior é calculada de acordo com a equação 3.6, sendo T um parâmetro designado temperatura que

decai a partir de um valor inicial, de acordo com uma função específica, a função de decaimento, $custo_{nova}$ a avaliação da nova solução a considerar, e $custo_{atual}$ a avaliação da melhor solução até ao momento, no caso de um processo de minimização.

$$p = e^{-\frac{custo_{nova} - custo_{atual}}{T}} \quad (3.6)$$

Esta função pode ter várias formulações, sendo as mais comuns a proporcional $T(t) = \alpha T(t-1)$ usando uma razão inferior a 1, e a exponencial $T = T_0 e^{-\alpha t}$.

Embora o MATLAB possua o seu próprio algoritmo de [Simulated Annealing \(SA\)](#), a sua adaptação ao problema em estudo não é imediata devido à necessidade de definir a função de vizinhança e a representação escolhidas, tendo-se por isso optado por uma implementação alternativa, seguindo pseudocódigo ilustrado abaixo [52].

```

Inicializa a melhor solução até ao momento: S_atual=S_inicial
Avaliação S_inicial: A_atual=Avaliação (S_atual)
i=0
T=Tmáx
Enquanto (T>Tminima)
  Para cada passo de 1 até n_passos Repete
    Seleciona um novo ponto (S_nova) na vizinhança de S_atual
    A_nova=Avaliação(S_nova)
    Se A_nova.custo < A_atual.custo
      então
        S_atual= S_nova
        A_atual= A_nova
    Senão se (elseif) Random [0,1] <  $e^{\frac{A_{atual}.custo - A_{nova}.custo}{T}}$ 
      Então
        S_atual= S_nova
        A_atual= A_nova
    Fim Se
  Fim Repete
  i=i+1 (nº de iterações)
  Atualiza a temperatura de acordo com a função de decaimento

                                      $T = T_0 e^{-\alpha i}$ 
Fim enquanto

```

3.5.3 Abordagem Multi-objetivo com Simulated Annealing

A abordagem anterior tem como objetivo encontrar a melhor solução em termos de resiliência, sem ter em conta outro tipo de consequências como, por exemplo, o custo de implementação, que será essencialmente função dos comprimento das novas linhas a instalar. Nesse sentido, estudou-se a hipótese de proceder a uma abordagem multi-objetivo que procure em simultâneo, minimizar o custo e minimizar a indisponibilidade sendo que estes são à partida objetivos que entram em conflito. Neste caso, torna-se impossível obter uma solução ótima, uma vez que o ótimo para um dos objetivos não corresponde ao ótimo do segundo objetivo e vice-versa. Assim, o objetivo passa a ser encontrar um conjunto de soluções que ofereçam alguma vantagem ao decisor, caindo sobre este a decisão última sobre qual o compromisso a estabelecer que permita levar à identificação da solução desejada. Para proceder a uma otimização multi-objetivo, interessa encontrar um método de otimização adequado, sendo a primeira escolha, a utilização de uma versão multi objetivo do *simulated annealing* tendo a escolha recaído sobre a implementação de Suppaitnarm et al. ([SMOSA](#)) [72].

Entre as principais diferenças entre o [SA](#) e o [SMOSA](#), a comparação de duas soluções faz uso do conceito de dominância, uma solução a domina b se e só se a é pelo menos tão boa quanto b em todos os critérios e estritamente melhor em pelo menos um. Para além disso, a comparação de soluções resulta na identificação de um conjunto de soluções não dominadas, que vão sendo arquivadas numa lista devolvida no final. Finalmente, a probabilidade de aceitação de uma solução não dominada entra em consideração com uma ponderação das diferenças por objetivo entre soluções, calculada de acordo com a equação 3.7, sendo Δ definido de acordo com a equação 3.8, n o número de critérios, a_i e b_i a avaliação das soluções a e b segundo o critério i , e k_i um fator de escala e ponderação.

$$P = \frac{2}{(1 + e^{\frac{\Delta}{T}})} \quad (3.7)$$

$$\Delta = \sum_i^n \frac{a_i - b_i}{k_i} \quad (3.8)$$

O pseudocódigo do [SMOSA](#) [52] encontra-se ilustrado abaixo.

```

i=0
T=T0
Enquanto (T>critério de paragem)
  S_atual = uma das soluções não dominadas escolhida aleatoriamente
  A_atual=Avaliação(S_atual)
  Para cada passo de 1 até n_passos Repete
    Seleciona um novo ponto (S_nova) na vizinhança de S_atual
    A_nova=Avaliação(S_nova)
    Se A_nova dominar A_atual ou A_atual não dominar A_nova
      então
        S_atual= S_nova
        A_atual= A_nova
        Atualiza lista de soluções não dominadas
      Senão se Random [0,1] <  $P = \frac{2}{1 + \exp(\frac{\Delta}{T})}$ 
        com  $\Delta$ =vetor de diferenças entre A_atual e A_nova
        Então
          S_atual= S_nova
          A_atual= A_nova
      Fim Se
    Fim Repete
  i=i+1 (nº de iterações)
  Atualiza a temperatura de acordo com a função de decaimento  $T = T_0 e^{-\alpha i}$ 
Fim enquanto não atingir o critério de paragem

```

Para aplicar o [SMOSA](#) ao problema em estudo foi necessário definir uma forma de avaliar o custo de cada solução. Sendo uma solução composta por um conjunto de troços e seccionador a acrescentar à rede pré-existente, a determinação exata do custo deveria implicar o conhecimento da localização geográfica de cada nó, para determinação da distância euclidiana entre eles, e a determinação das necessidades de reforço da rede pré-existente a acautelar. Contudo, os dados das redes de teste normalmente não incluem as coordenadas geográficas dos nós mas apenas o comprimento das linhas que os interligam. Assim, apenas é possível determinar uma distância entre qualquer par de nós da rede, correspondente ao caminho mais curto entre eles determinado a partir da informação existente. No entanto, esta distância será uma aproximação por excesso, relativamente à distância, mas que permite compensar outros custos não acautelados por falta de informação, nomeadamente os custos dos seccionadores e dos reforços necessários nos troços pré-existentes. O cálculo destas distâncias é concretizado pela utilização da função *distances* do MATLAB que calcula o caminho mais curto entre todos os pares de nós de um grafo. De notar que a unidade de medida deste objetivo é assim o metro, assumindo que o custo será essencialmente proporcional ao comprimento, não obstante poderem existir outros fatores que o influenciam.

Dado que duas situações de indisponibilidade temporal idênticas podem corresponder a quantidades de energia não servida muito diferentes, resultantes da diferente importância das cargas que ficam por abastecer, resulta igualmente interessante considerar um terceiro objetivo de minimização deste fator. O cálculo da energia não servida será feito em paralelo com o cálculo da indisponibilidade, através do integral da potência não servida num dado período de tempo em análise, com o cuidado de garantir a unidade de medida correta (kWh), tal como representado na equação 3.9.

$$E_{NS} = \sum_{P_{\text{grid}}(\Delta t) > 0} P_{\text{grid}}(\Delta t) \times \Delta t \quad (3.9)$$

3.6 Determinação de configuração em caso de falha

A aplicação de qualquer um dos processos de otimização descritos anteriormente permite identificar uma solução como um conjunto de troços adicionais a inserir numa rede radial, de modo a permitir que em caso de falha de um dos troços da rede se possa tentar manter a alimentação a todas as cargas. Dado que se deseja manter sempre uma exploração radial, a rede tem assim que ser reconfigurada fechando seccionadores normalmente abertos e abrindo seccionadores que estavam anteriormente fechados. A rede aumentada com os troços adicionais é naturalmente uma rede com malhas, contendo diversas redes radiais resultantes das possíveis combinações de seccionadores abertos e fechados.

Admitindo que a solução proposta garante a não criação de ilhas, o problema de obter a configuração radial ótima em resposta ao corte de um troço específico passa assim a poder ser definido pela determinação da árvore de custo mínimo que abranja todos os nós da rede. Para o concretizar, aplica-se um algoritmo de determinação da árvore abrangente mínima como, por exemplo, o disponibilizado pela função *minspantree* do MATLAB.

Uma vez que uma solução pode, no entanto, proporcionar a existência de ilhas, é necessário prever o caso em que um corte de um troço as possa provocar, determinando primeiro todas as sub-redes criadas e posteriormente a árvore

mínima abrangente de cada uma delas. A configuração neste caso será um conjunto de redes radiais de custo mínimo que, se a solução for ótima em termos de indisponibilidade, corresponderá a ilhas com capacidade de subsistir com a sua geração própria e uso da flexibilidade de cargas nelas contidas. A determinação das sub-redes é efetuada de forma similar ao que foi descrito no caso do estudo da resiliência.

O excerto de código abaixo ilustra este processo implementado em MATLAB.

```
function tree=obtemarvore(trocos,sol,corte)
    global distancias;
    g=graph(trocos(:,1),trocos(:,2),trocos(:,3));
    for i=1:2:numel(sol)
        g=addedge(g,sol(i),sol(i+1),distancias(sol(i),sol(i+1)));
    end
    g=rmedge(g,corte(1),corte(2));
    subs=conncomp(g);
    tree={};
    for subr=1:max(subs)
        indices = find(subs==subr);
        s=subgraph(g,indices);
        t=minspantree(s);
        tree{end+1}=[indices(t.Edges.EndNodes),t.Edges.Weight];
    end
end
```

ESTUDO DE CASO

O teste da metodologia proposta implica a necessidade de definir um conjunto extenso de dados, nomeadamente composto por séries temporais de dados de consumo e produção, para além da geometria de uma rede, através da definição de um conjunto de nós onde se concentram as cargas e recursos de produção, e das linhas que os interligam. Para este fim procurou-se usar uma definição de rede que oferecesse uma base de teste reconhecida, tendo-se optado por uma proposta da [CIGRE](#) para uma microrrede de teste, para as quais existiam não só os dados da própria rede como uma proposta de definição de cargas e de geração distribuída [73]. Contudo, dado que apenas eram definidas potências nominais, foi necessário associar-lhes diagramas de carga e de produção. Na ausência de um conjunto de dados real completo, para além dos diagramas de carga e de flexibilidade obtidos a partir do modelo de Richardson, de acordo com o que já foi descrito no capítulo anterior, descreve-se assim em primeiro lugar como se obtiveram diagramas representativos das diferentes formas de produção renovável a partir de fontes disponíveis representativas de instalações em território Português. Define-se igualmente a forma de aferir a possível contribuição das fontes controláveis previstas no modelo de rede. Finalmente, descrevem-se os resultados obtidos por aplicação da metodologia anteriormente descrita.

4.1 Escolha da rede de teste

Para aplicar a metodologia descrita no capítulo anterior, foi escolhida uma rede de referência de baixa-tensão, constituída por um alimentador de baixa-tensão que fornece uma área residencial suburbana incluindo um conjunto de fontes renováveis representativas de todas as tecnologias atualmente importantes, ligadas a nós selecionados [73]. Esta rede em questão foi desenvolvida num projeto europeu e adotada pela CIGRE como uma rede de teste de baixa tensão para estudos de microrredes, permitindo testar múltiplas soluções de geração distribuída, entre outros. Assim, a rede em questão, apresentada na figura 4.1, é uma rede radial com 18 nós, para a qual são dadas informações sobre a composição das linhas e o seu comprimento, cujas ligações estão descritas na tabela 4.1, e para a qual os autores de [73] propõem ainda valores de potência de carga e geração.

Tabela 4.1: Dados dos troços da rede CIGRE

Nó partida	Nó chegada	Comprimento (m)	Tipo de linha	R (Ω/km)	X (Ω/km)	R (Ω)	X (Ω)
1	2	35	1	0,284	0,083	0,00994	0,002905
2	3	35	1	0,284	0,083	0,00994	0,002905
3	4	30	7	3,69	0,094	0,1107	0,00282
3	5	35	1	0,284	0,083	0,00994	0,002905
5	6	35	2	0,497	0,086	0,017395	0,00301
6	7	35	2	0,497	0,086	0,017395	0,00301
7	8	35	2	0,497	0,086	0,017395	0,00301
8	9	30	10	0,822	0,077	0,02466	0,00231
5	10	35	1	0,284	0,083	0,00994	0,002905
10	11	35	1	0,284	0,083	0,00994	0,002905
11	12	30	9	0,871	0,081	0,02613	0,00243
11	13	35	1	0,284	0,083	0,00994	0,002905
13	14	35	1	0,284	0,083	0,00994	0,002905
14	15	35	1	0,284	0,083	0,00994	0,002905
15	16	30	7	3,69	0,094	0,1107	0,00282
15	17	35	1	0,284	0,083	0,00994	0,002905
17	18	30	8	1,38	0,082	0,0414	0,00246

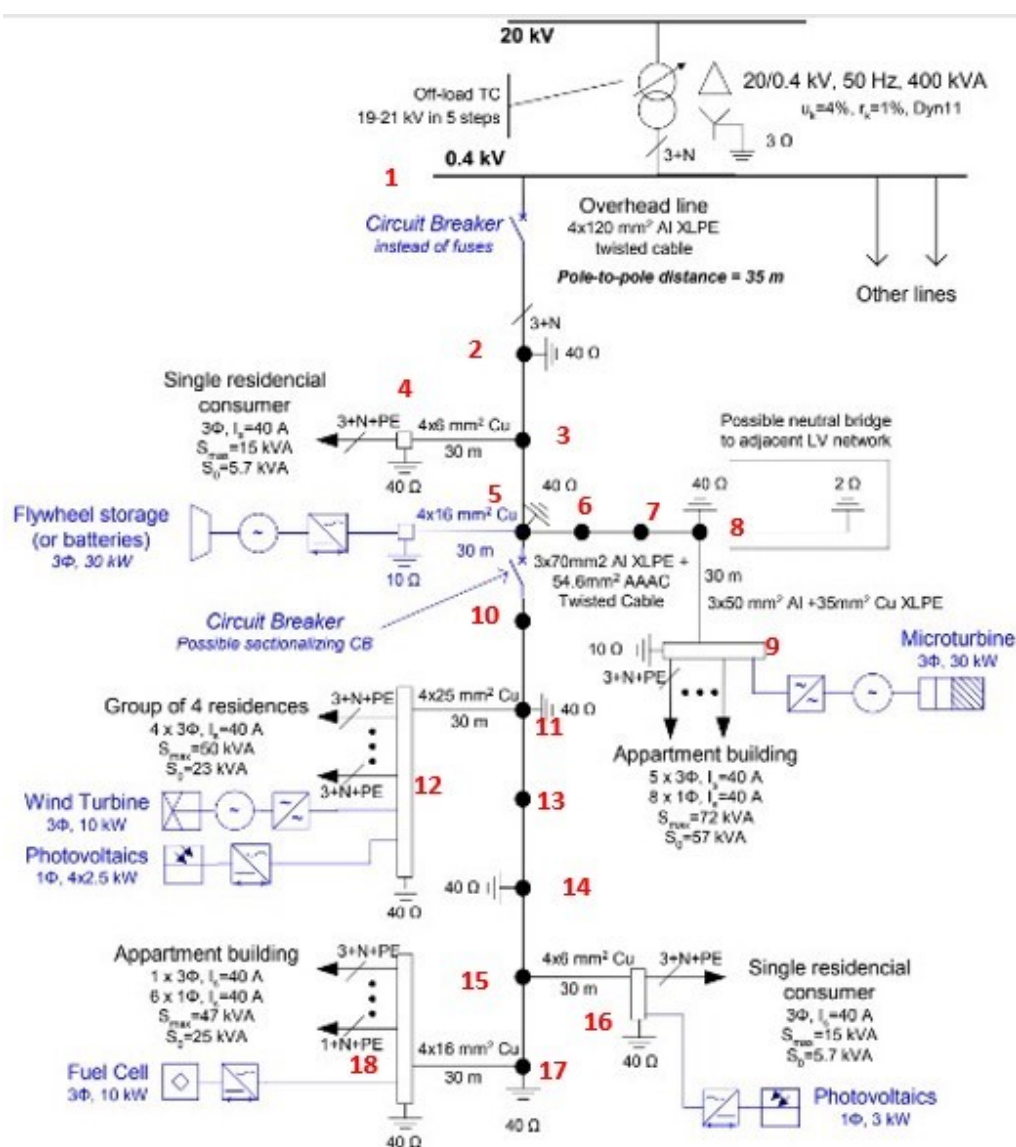


Figura 4.1: Microrrede de referência da CIGRE [73]

4.1.1 Definição de dados de consumo

De acordo com a informação presente na figura 4.1, as cargas residenciais da rede são constituídas por algumas moradias e alguns blocos de apartamentos, num total de 26 habitações. Para definir estas cargas foi utilizado o modelo excel de Richardson [71], já referenciado no capítulo anterior, para criar os 26 modelos de habitação com características diferentes dependendo do tipo de casa. As simulações foram realizadas para o mês de fevereiro, considerando um dia útil, para 26 habitações, com especificações diferenciadas de número de ocupantes e de equipamentos existentes, tal como representado na tabela I.3 do anexo I.

A partir destes ficheiros excel, foram extraídos para MATLAB os 26 diagramas diários de carga total, assim como os diagramas soma das cargas consideradas flexíveis (máquinas de lavar, aquecimento ambiente, ar-condicionado e aquecimento de água) com uma resolução de 1 minuto. Através destes, foi possível a criação de diagramas de carga e de flexibilidade agregados por nós da rede, tal como indica a figura 4.2, e que correspondem aos nós 4, 9, 12, 16 e 18, de acordo com a afetação indicada na tabela I.1 do anexo I.

Apesar de o modelo de Richardson poder não ser completamente ajustado ao caso português não se conhece informação alternativa com o detalhe que permitisse nomeadamente o desacoplamento das cargas flexíveis. Por outro lado, crê-se que apesar de tudo estes dados permitem testar a metodologia proposta, sendo esse o objetivo pretendido.

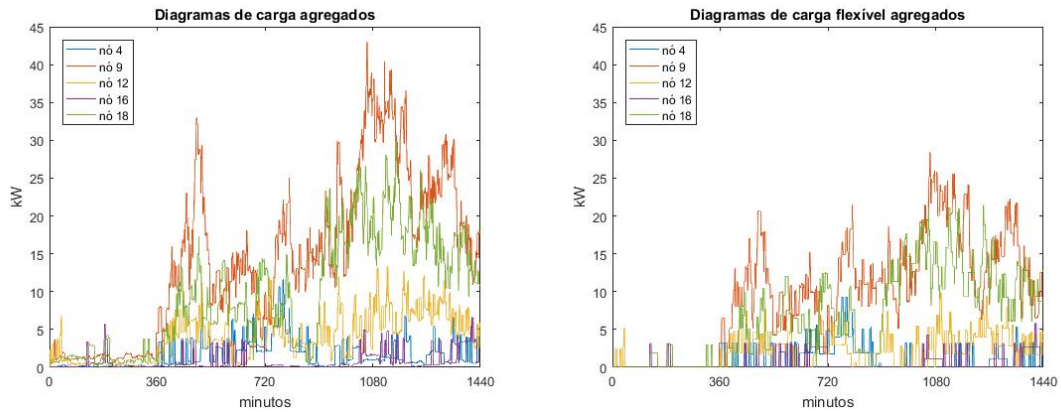


Figura 4.2: Agregação de cargas residenciais por nó ao longo de um dia

4.1.2 Definição de dados de produção

Papathanassiou et. al [73] definem um conjunto de unidades de geração para a rede de referência com valores de potência que se assumem como a potência nominal, nomeadamente uma turbina eólica de 10kW, uma microturbina a gás de 30kW, uma pilha de combustível de 10kW, 2 conjuntos de painéis fotovoltaicos num total de 13kW e um sistema de armazenamento composto por uma *flywheel* ou baterias com 30kW. Assim, tornou-se necessário criar diagramas de produção com a mesma resolução dos diagramas de consumo, adequados ao tipo de geração considerada, que realisticamente possam servir para testar a metodologia proposta.

Para definir a produção renovável, começou-se por obter um diagrama de produção fotovoltaica usando o [PVGIS](#)¹ para simular um painel de 1 kW situado no Monte da Caparica usando as definições ótimas de acordo com o [PVGIS](#). Este diagrama de produção foi usado para os dois conjuntos de painéis simulados, ajustando a potência de forma correspondente. Foi usado o ano mais recente que o [PVGIS](#) proporciona (2016), não obstante ser um ano bissexto. Obteve-se também um diagrama de produção eólica nacional (fonte: [REN](#)²) tendo-se escolhido o ano de 2016 para corresponder ao utilizado no [PVGIS](#). Contudo, dado que o diagrama de produção nacional corresponde à agregação de inúmeras turbinas individuais, possui variações de potência que representam a entrada e a saída de serviço de múltiplas turbinas, não sendo assim uma representação totalmente adequada para uma única turbina individual como a proposta para a rede.

Assim, a fim de obter o diagrama de produção eólica para a potência pretendida, procurou-se aproveitar a variação do diagrama de produção nacional mas limitando-o de forma a que sature num máximo durante uma parcela do ano especificada, sendo posteriormente escalado para a potência máxima pretendida, representando assim melhor o comportamento de uma turbina isolada. Para este efeito criou-se uma rotina MATLAB que requer a especificação de um possível nível de saturação. Criou-se também uma rotina MATLAB para obter o diagrama de um dia específico a partir de um diagrama de 8760 (ano comum) ou 8784 horas (ano bissexto) e uma rotina MATLAB para transformar um diagrama de 24 horas num diagrama de 1440 minutos usando interpolação. Estas rotinas são usadas para os dois tipos de produção renovável a fim de compatibilizar os diagramas de produção com os de consumo. A figura 4.3 representa o diagrama original de produção eólica nacional do dia 22 de fevereiro de 2016 e o diagrama obtido após o tratamento atrás descrito, assumindo uma saturação durante 50% do ano.

Dado que o objetivo é, no essencial, estudar situações em que a produção local não seja suficiente para as cargas, a potência a considerar nas unidades controláveis, como a turbina e a pilha de combustível definidas na rede em estudo, será sempre a potência máxima destas unidades. Uma representação desta potência para a totalidade dos 1440 minutos, e consequentemente o gráfico da produção total da rede, serão assim apenas uma representação do potencial de geração.

¹<https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>

²<https://www.mercado.ren.pt/PT/Electr/Paginas/default.aspx>

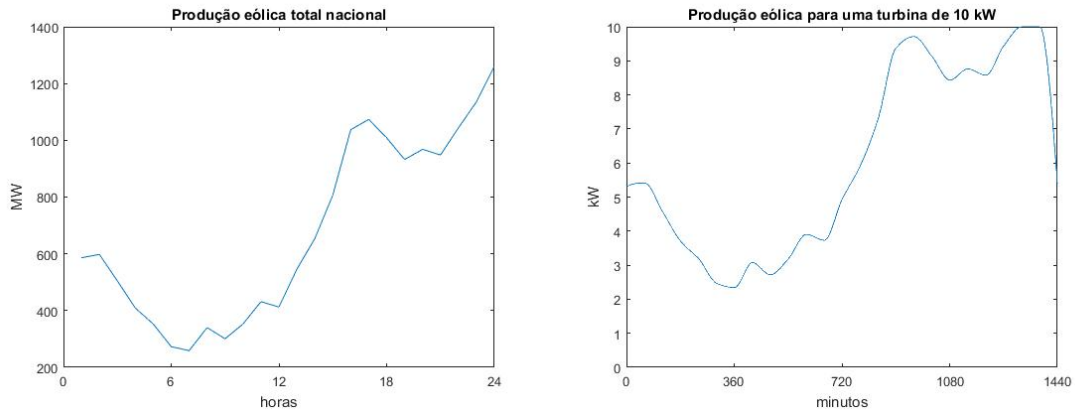


Figura 4.3: Produção eólica nacional e diagrama obtido após transformação

4.1.3 Validação e correção da rede escolhida

A figura 4.4 ilustra a comparação entre o diagrama de carga total (a azul), o diagrama de potencial de produção interna da rede (linha laranja), não considerando ainda o sistema de armazenamento de energia de 30kW, e o diagrama de flexibilidade (a vermelho), que corresponde à soma de todas as cargas consideradas flexíveis. É visível que o potencial de produção é suficiente para a carga local na maior parte do tempo, sendo apenas ultrapassada em períodos curtos e com uma diferença não muito significativa, o que torna a rede nestas condições pouco interessante para testar a metodologia proposta. De resto, nos poucos períodos em que a carga total excede a produção local, a flexibilidade é praticamente suficiente para evitar o colapso da rede.

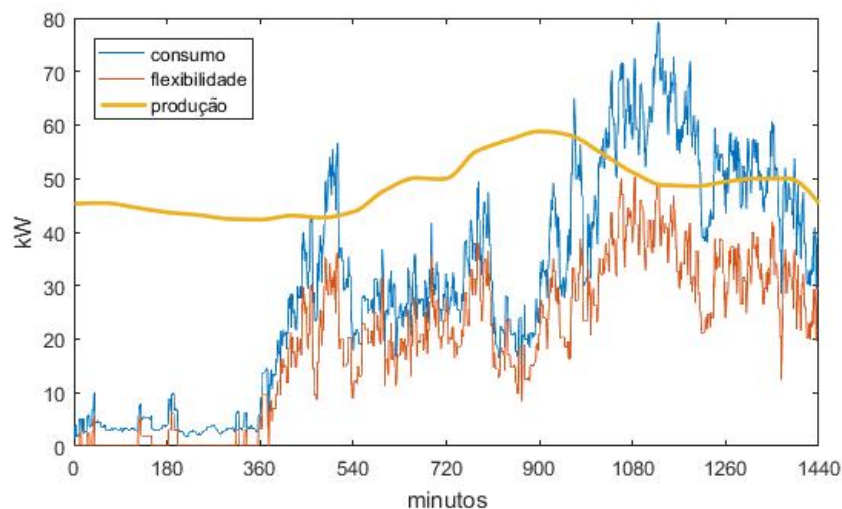


Figura 4.4: Análise da primeira proposta de dados para a rede em estudo

A análise dos diagramas de carga agregados por nós da rede (fig. 4.2) permite perceber que os máximos desses diagramas são em alguns casos bastante inferiores à potência de carga que constava nos dados originais da rede, nomeadamente nos nós 9, 12 e 18, indicando que os resultados obtidos com o modelo de Richardson não permitem compatibilizar o número de habitações especificado por Papathanassiou et. al [73] com as potências por eles definidas. Por exemplo, para o nó 12 estavam indicadas 4 residências correspondentes a uma potência máxima de 50 kVA, no entanto, o pico do diagrama obtido pela agregação de 4 diagramas gerados através do modelo de Richardson representando grandes residências, e que tinha sido atribuído a esse nó, é de 15,7 kW.

Dado que as diferenças entre os máximos dos diagramas agregados e as potências especificadas para os nós implicariam um número elevado de habitações em falta, assumiu-se como preferível rever simultaneamente os diagramas de carga e os diagramas de produção, alterando as potências das unidades de geração. Relativamente ao aumento de carga, geraram-se oito novos diagramas de habitações grandes que foram atribuídas da seguinte forma: 2 ao nó 9, 4 ao nó 12, e 2 ao nó 18. Os dados de entrada no modelo de Richardson relativos a estas habitações estão na tabela I.4 do anexo I, assim como a afetação destas aos nós da rede (tabela I.2). Em relação à diminuição de potência de geração, optou-se por reduzir a microturbina para 15 kW e a pilha de combustível para 5kW, mantendo-se as restantes potências originais, tendo como objetivo uma redução distribuída, retirando também o sistema de armazenamento sugerido para o nó 5. Em resultado destas alterações, obtiveram-se os diagramas ilustrados na figura 4.5 que se consideram mais adequados para o estudo da metodologia proposta.

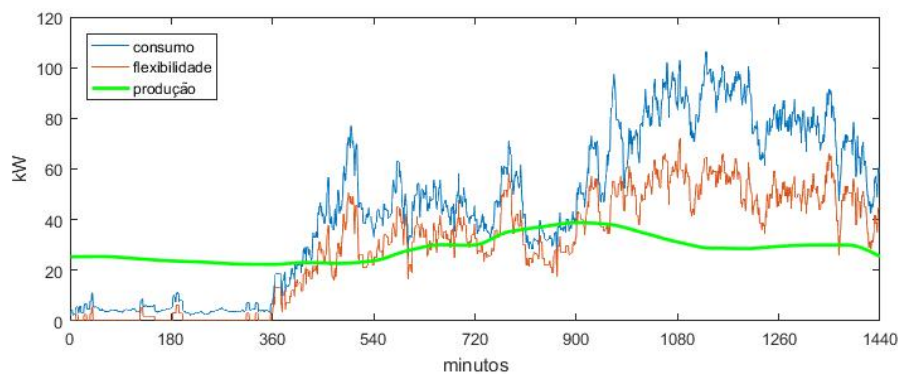


Figura 4.5: Potencial de produção, carga e flexibilidade disponível

4.2 Análise de Resultados

Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos pela aplicação sequencial dos elementos da metodologia proposta.

4.2.1 Teste de indisponibilidade por corte de um troço da rede

Em primeiro lugar, realizou-se um teste de resiliência da rede de acordo com o processo descrito na secção 3.4, mas apenas considerando o corte de um troço de cada vez. Recorde-se que sendo a rede radial, o corte de um troço implica o isolamento de uma parte da rede, permanecendo o restante ligado ao alimentador principal. A parte isolada pode subsistir se a potência gerada for suficiente para as cargas ou se o corte de uma parte da carga flexível o permitir. A figura 4.6 ilustra assim o resultado desse ensaio em termos de tempo de disponibilidade das sub-redes isoladas, sendo possível observar que o corte dos troços {5-6, 6-7, 7-8, 8-9} resulta numa disponibilidade quase total, correspondendo a uma capacidade da rede de se auto-sustentar durante 1384 dos 1440 minutos de um dia.

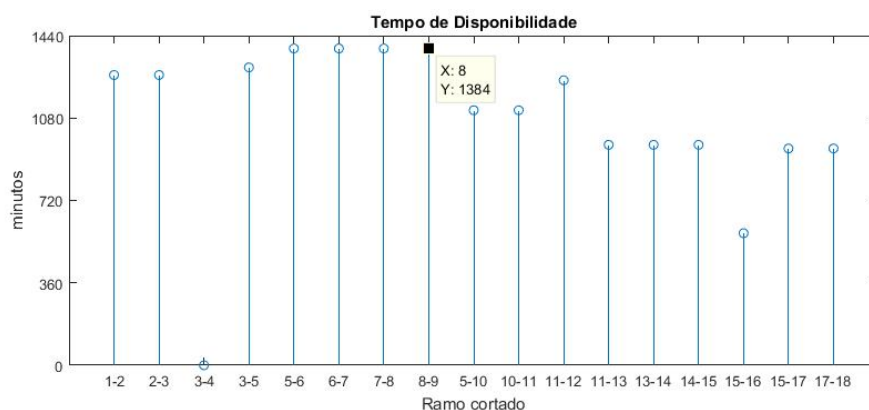


Figura 4.6: Disponibilidades temporais das sub-redes isoladas

Por outro lado, é possível também verificar que cortar o troço que liga a rede ao alimentador resulta em 172 minutos de indisponibilidade. O caso em que a rede revela não ter qualquer capacidade de subsistência deve-se ao corte do terceiro troço. No entanto, como se verifica na figura 4.7, esta indisponibilidade corresponde a uma quantidade pouco significativa de energia não servida, uma vez que este nó apenas serve uma única habitação. Para além destes fatores é de notar que este nó não tem associada nenhuma forma de produção de energia.

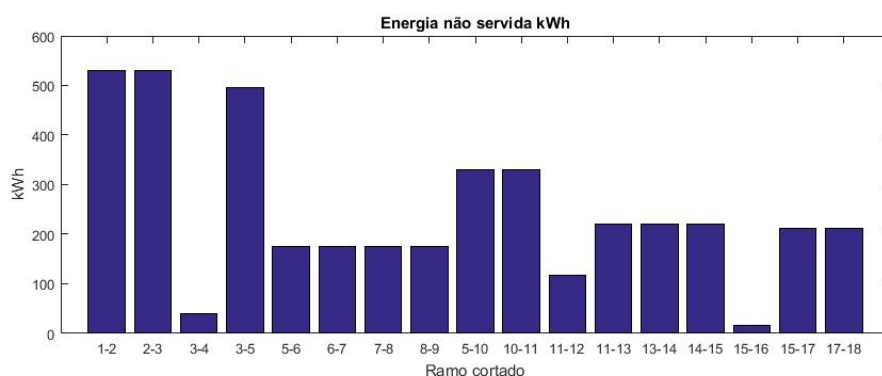


Figura 4.7: Energia não servida por perda total de carga ou corte seletivo

Com uma última observação, é importante realçar que o corte dos troços 1-2 e 2-3 resultam na mesma sub-rede assim como os conjuntos compostos pelos troços {5-6, 6-7, 7-8, 8-9}, {5-10, 10-11}, {11-13, 13-14, 14-15} e {15-17, 17-18}.

De notar que caso não fosse utilizada a flexibilidade, os resultados em termos de resiliência da rede seriam bastante piores em todas as circunstâncias, como mostra a figura 4.8.

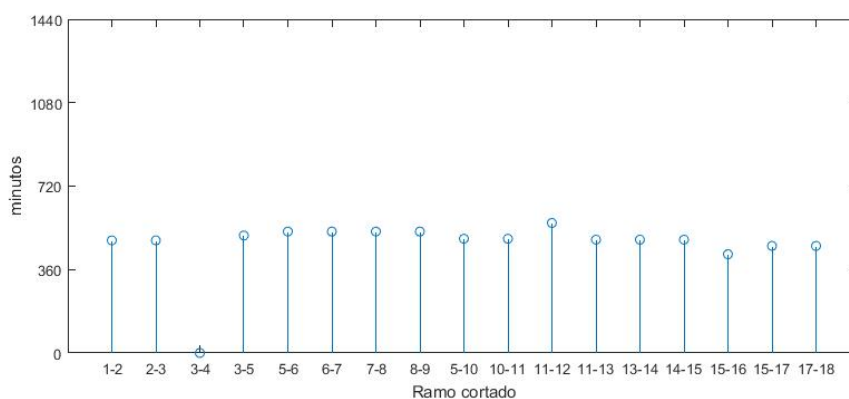


Figura 4.8: Disponibilidades das sub-redes sem o uso da flexibilidade

4.2.2 Reconfiguração para minimizar indisponibilidades

Tal como explicado na secção 3.5, o objetivo da reconfiguração consiste em determinar que ligações adicionais permitiriam a melhoria dos resultados em termos de indisponibilidade, ao proporcionar caminhos alternativos que permitam eliminar o isolamento, através do fecho de seccionadores normalmente abertos.

Mesmo numa pequena rede como a em estudo, o número de hipóteses a testar pode atingir facilmente uma dimensão insustentável que impede um ensaio exaustivo de hipóteses, o que justifica a escolha de um método de pesquisa através de heurísticas como o escolhido.

O uso de uma abordagem com *Simulated Annealing* requer contudo a escolha de um conjunto de parâmetros para os quais não existe uma forma de determinação óbvia, nomeadamente a temperatura inicial (T_0), o fator de decaimento que controla a forma como a temperatura evolui (α), o número de passos de repetição, e o valor de temperatura (T_{final}) que determina o fim do processo (ou o número de iterações que permite determinar alguns destes parâmetros em função dos outros).

Para determinar valores adequados a este caso, realizaram-se vários ensaios, inicialmente considerando apenas o corte de um único troço em simultâneo, e a possibilidade de inserir até 3 novas interligações, apresentando-se na figura 4.9 a evolução dos resultados com $T_0 = 50$, $\alpha = 0.2$, 20 passos de repetição e $T_{\text{final}} = 0.001$. Nos vários ensaios, foi possível atingir várias vezes uma solução ótima, com 0 minutos de indisponibilidade, tendo-se identificado várias soluções ótimas alternativas nomeadamente, [1 – 16 4 – 9 12 – 18], [1 – 16 4 – 12 9 – 18] e [1 – 16 4 – 18 9 – 12] (figura 4.10).

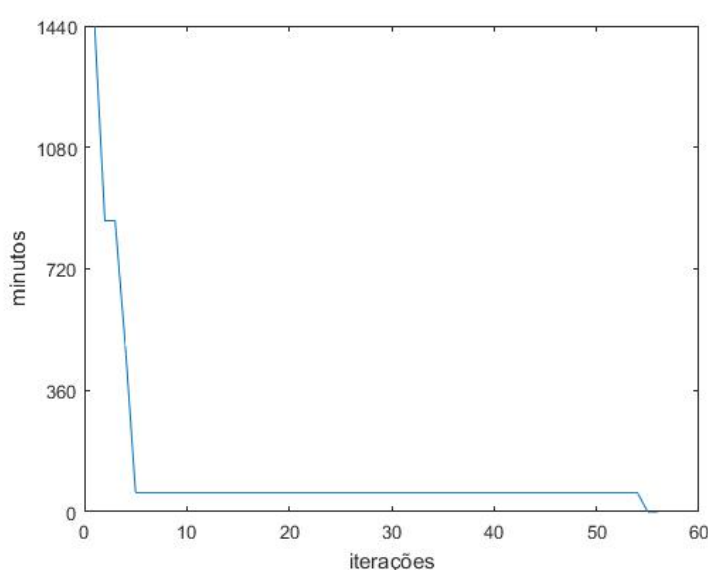


Figura 4.9: Evolução do processo *simulated annealing* - melhor solução vs iteração

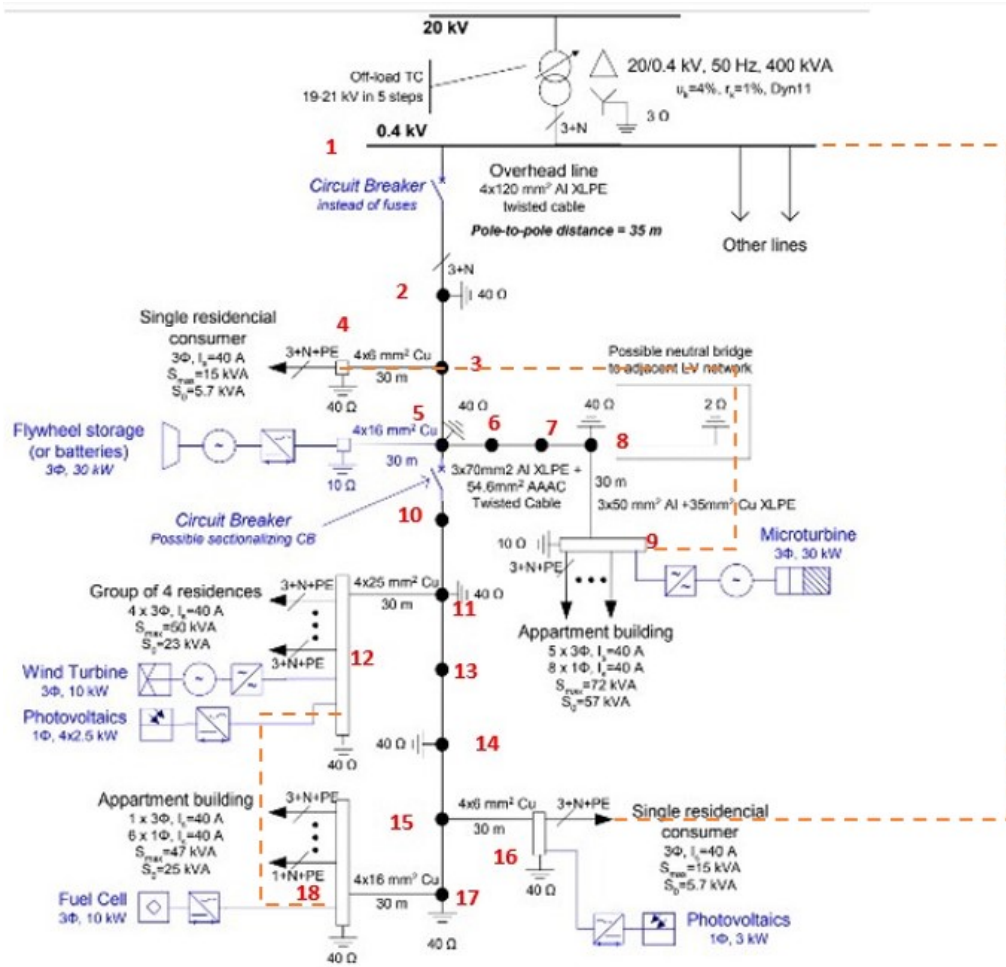


Figura 4.10: Representação da melhor solução encontrada com as novas interligações representadas a tracejado

Considerando agora a possibilidade de cortar dois troços em simultâneo, obteve-se através do mesmo processo, com $T_0 = 50$, $\alpha = 0.2$, 20 passos de repetição e $T_{final} = 0.001$, o resultado apresentado na figura 4.11 correspondente à solução [1–9 4–18 12–16]. O processo levou naturalmente mais tempo a terminar, dado que o número de combinações a testar aumentou de forma significativa mesmo para uma rede com apenas 18 nós. A solução obtida coincide com as soluções obtidas no corte de um troço único.

De facto, qualquer das sub-rede criada pelo corte de dois troços da rede original é testada aquando do estudo do corte de um só troço, pelo que o resultado em termos de tempo de indisponibilidade não pode ser diferente.

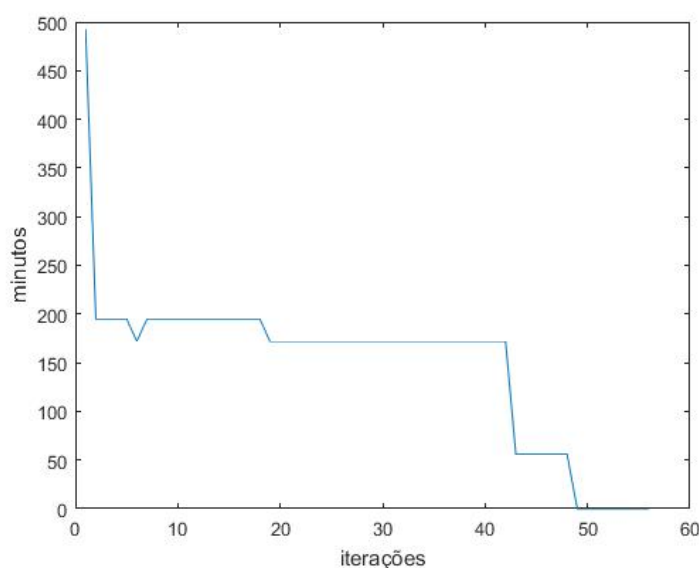


Figura 4.11: Evolução do processo *simulated annealing* para a falha de 2 troços - melhor solução vs iteração

4.2.3 Reconfiguração com custo como segundo objetivo

As várias soluções encontradas como ótimas na abordagem anterior (*simulated annealing*) embora sejam equivalentes em termos de disponibilidade por ligarem os mesmos nós, traduzem-se em linhas de comprimento diferente. Usando a métrica definida na secção 3.5.3 verifica-se que a solução [1–16 4–9 12–18] corresponde a um custo de 710, e as soluções [1–16 4–12 9–18] e [1–16 4–18 9–12] correspondem ambas a um custo de 850, demonstrando assim a utilidade de proceder a uma abordagem multi-objetivo. Assim, apesar de estas soluções serem ótimas relativamente ao critério da indisponibilidade, o seu custo monetário pode ser excessivo o que leva à possibilidade de existirem outras soluções menos perfeitas que sejam aceitáveis por parte do decisor, estabelecendo um compromisso entre os dois critérios.

Recorrendo então à abordagem multi-objetivo descrita na secção 3.5.3 executou-se o algoritmo **SMOSA** para minimização simultânea de indisponibilidade e custo, tendo-se obtido o conjunto de soluções não dominadas cuja representação em termos de objetivos é visível na figura 4.12. A escolha de uma solução em concreto deverá caber naturalmente a um decisor real, porque só ele saberá definir um compromisso adequado às suas necessidades. Contudo, a título de exemplo, ilustra-se na figura 4.12 a identificação de duas possíveis soluções aceitáveis assumindo

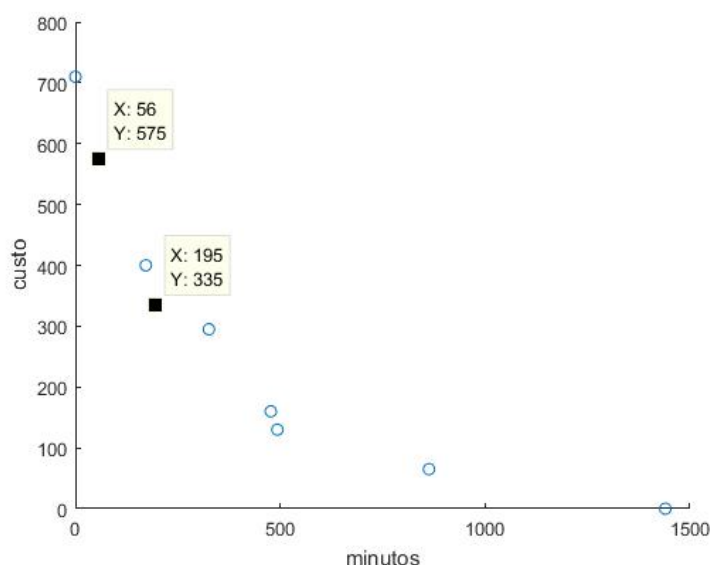


Figura 4.12: Conjunto de soluções não dominadas, abordagem bi-objetivo

que o decisor possa aceitar uma pequena indisponibilidade para baixar razoavelmente o custo de investimento. Através da tabela 4.2 pode ainda verificar-se que algumas das soluções não dominadas representam conjuntos com menos ligações correspondendo por essa razão a um menor custo, sendo o ótimo da função custo obtido na ausência de qualquer investimento resultando numa indisponibilidade total de alguma das sub-redes.

Tabela 4.2: Conjunto de soluções não dominadas

Solução	Indispon. (minutos)	Custo (metros)
[1 – 16 4 – 9 12 – 18]	0	710
[1 – 18 4 – 5 12 – 16]	56	575
[4 – 15 12 – 13 16 – 18]	172	400
[4 – 15 16 – 18]	195	335
[2 – 4 11 – 16 16 – 18]	326	295
[2 – 4 16 – 18]	477	160
[4 – 5 16 – 17]	493	130
[4 – 5]	863	65
[]	1440	0

4.2.4 Reconfiguração com três objetivos

Conforme referido nas secções 3.5.3 e 4.2.1, por vezes situações de indisponibilidade reduzida podem corresponder a uma quantidade de energia não servida elevada. A título de exemplo, é possível observar nas figuras 4.6 e 4.7 que no caso em que se corta o ramo 1 ou 2 embora se obtenham poucos minutos de indisponibilidade, a energia não servida ultrapassa os 500 kWh. Da mesma forma se pode verificar que no caso em que o ramo 3 é cortado apesar da indisponibilidade ser total, a energia não servida atinge o valor de 50 kWh.

A aplicação da abordagem tri-objetivo resulta assim num conjunto de soluções não dominadas que agora deve ser analisado numa representação tridimensional e/ou confrontando representações bi-dimensionais de pares de objetivos. Um conjunto de soluções não-dominadas pode ser observado na tabela 4.3. Analisando primeiro as representações bi-dimensionais dos pares indisponibilidade-custo e energia não servida-custo (figura 4.13), procuraram-se soluções com compromissos semelhantes aos efetuados na análise bi-objetivo. Em primeiro lugar, analisaram-se soluções não dominadas segundo o par custo-minutos que depois se procuraram localizar na representação do par custo-energia não servida. Não sendo possível localizar soluções que fossem simultaneamente não dominadas segundo os dois pares de objetivos, procuraram-se soluções próximas que permitissem sacrificar ao mínimo um dos critérios. As figuras 4.14 e 4.15 fazem a representação tridimensional do conjunto de soluções não dominadas, ilustrando as duas soluções escolhidas de acordo com o procedimento anteriormente descrito, e que correspondem às ligações [1 – 11 4 – 18 12 – 16] e [1 – 4 3 – 16 16 – 18].

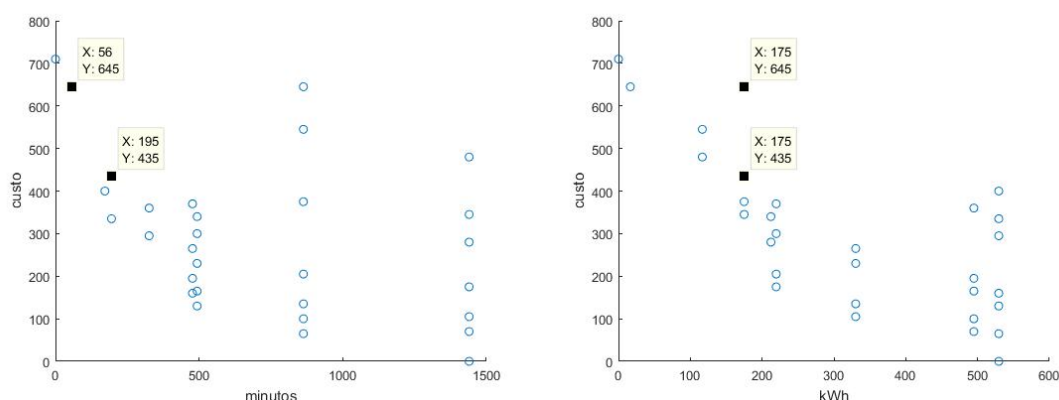


Figura 4.13: Conjunto de soluções não-dominadas com três objetivos

Tabela 4.3: Conjunto de soluções não dominadas da análise tri-objetivo

Solução	Indispon. (minutos)	Custo (metros)	Energia não servida (kWh)
[1 – 16 4 – 9 12 – 18]	0	710	0
[1 – 11 4 – 18 12 – 16]	56	645	174,98
[4 – 15 10 – 12 16 – 18]	172	400	529,53
[4 – 15 16 – 18]	195	335	529,53
[1 – 4 3 – 16 16 – 18]	195	435	174,98
[4 – 5 12 – 16 15 – 18]	326	295	529,53
[1 – 4 12 – 16 16 – 18]	326	360	494,83
[1 – 4 16 – 18]	477	195	494,83
[2 – 4 16 – 18]	477	160	529,53
[1 – 4 1 – 11 16 – 18]	477	370	219,59
[1 – 4 2 – 5 16 – 18]	477	265	330,28
[4 – 5 16 – 17]	493	130	529,53
[1 – 3 4 – 16]	493	340	212,25
[1 – 4 4 – 5 16 – 17]	493	230	330,28
[1 – 4 16 – 17]	493	165	494,83
[1 – 4 3 – 12 16 – 17]	493	300	219,59
[1 – 4]	863	100	494,83
[2 – 4]	863	65	529,53
[1 – 4 3 – 18]	863	375	174,98
[1 – 3 4 – 5]	863	135	330,28
[1 – 4 3 – 11]	863	205	219,59
[1 – 18 4 – 5 5 – 9]	863	545	116,78
[1 – 5 4 – 12 9 – 18]	863	645	16,52
[1 – 15]	1440	280	212,25
[1 – 5]	1440	105	330,28
[1 – 11]	1440	175	219,59
[1 – 3]	1440	70	494,83
[1 – 5 9 – 18]	1440	480	116,78
[1 – 18]	1440	345	174,98
[]	1440	0	529,53

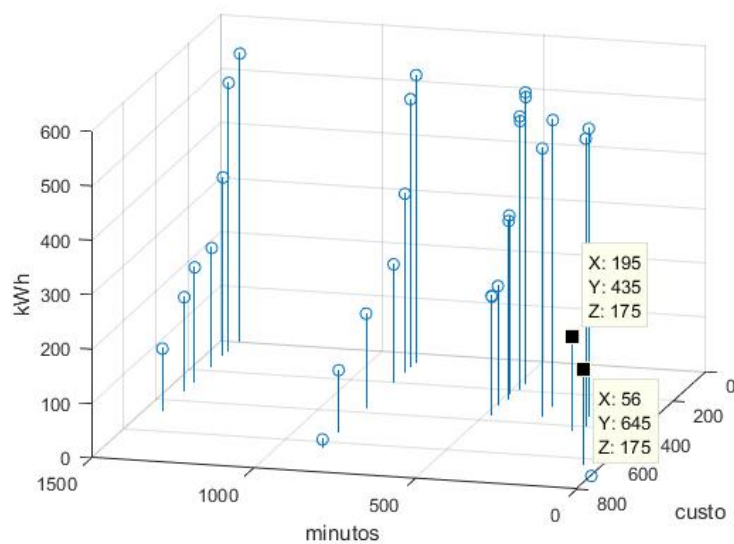


Figura 4.14: Representação tri-dimensional

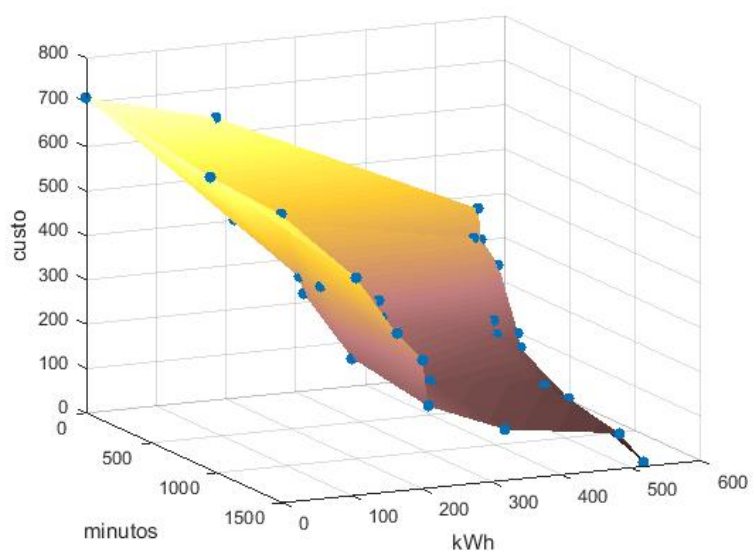


Figura 4.15: Representação através de uma superfície geométrica

Tabela 4.4: Configuração ótima resultante do corte do troço 3 – 5

Nó partida	Nó chegada	Custo
1	2	35
2	3	35
3	4	30
4	9	200
5	6	35
6	7	35
7	8	35
8	9	30
5	10	35
10	11	35
11	12	30
11	13	35
13	14	35
14	15	35
15	16	30
15	17	35
17	18	30

Dado que a solução acima testada garante a interligação de todas as cargas em qualquer circunstância de corte, nunca se torna necessário o uso de flexibilidade para assegurar a subsistência. Contudo, poderão existir redes para as quais não seja possível encontrar uma solução, pelo menos economicamente viável, com esse tipo de características. A título de exemplo, analisando agora uma das soluções de compromisso identificadas na secção 4.2.4, verifica-se que a solução [1 – 11 4 – 18 12 – 16] não garante a interligação de todos os nós em todos os casos, podendo criar uma pequena ilha. Neste caso, para um corte no troço 5 – 6, a configuração ótima resulta nas ligações representadas na figura 4.17. Esta solução apresentava um tempo de indisponibilidade máximo de 56 minutos e um valor máximo de 175 kWh de energia não servida que coincidem com o resultado do corte indicado. Contudo, a perda total de abastecimento ocorrida durante os 56 minutos, apenas corresponde a 22kWh, sendo os restantes 153 kWh o uso da flexibilidade ocorrida ao longo do tempo para manter a rede, como ilustra a figura 4.18.

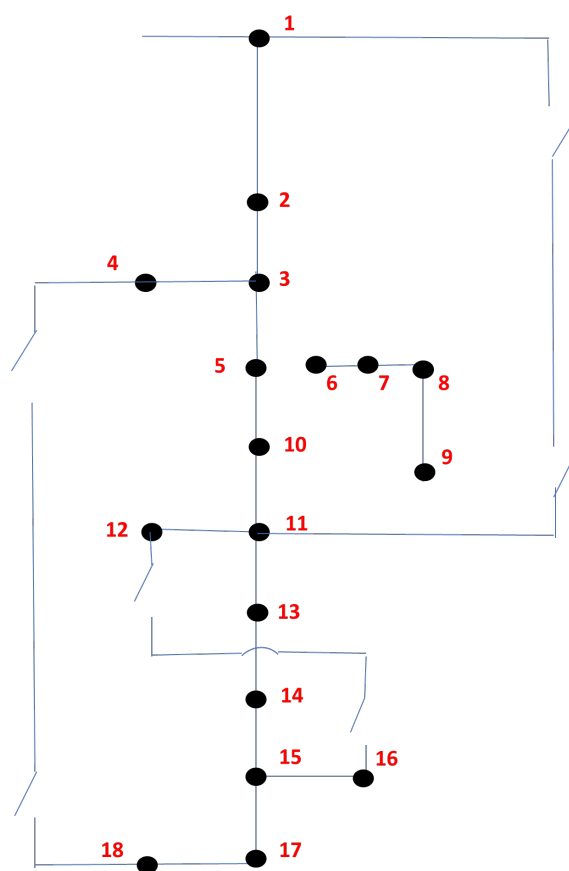


Figura 4.17: Configuração ótima resultante do corte do troço 5 – 6 na solução [1 – 11 4 – 18 12 – 16]

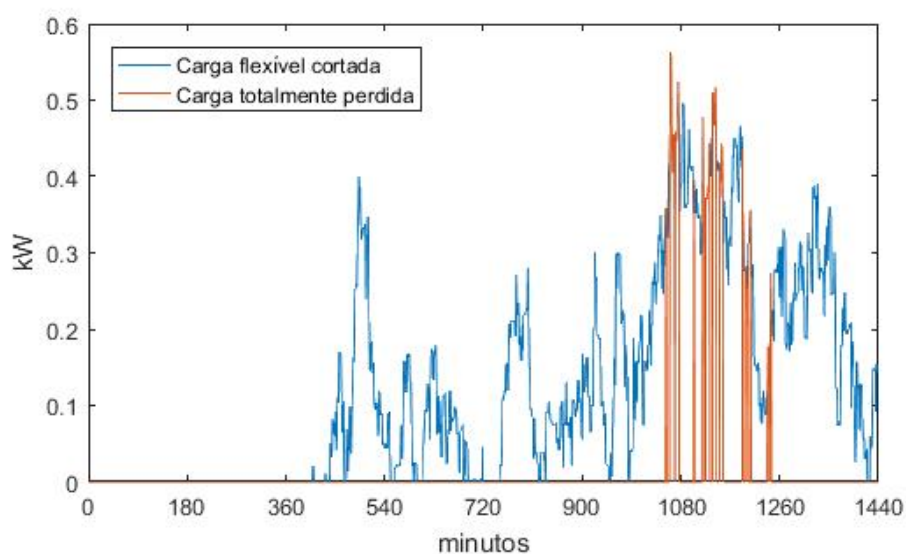


Figura 4.18: Energia não servida para um corte no troço 5 – 6 na solução [1 – 11 4 – 18 12 – 16]

CONCLUSÕES

Este trabalho pretendia estudar formas de aumentar a resiliência das microrredes, procurando garantir a subsistência a falhas em troços e nomeadamente na sua ligação à rede principal, através do uso combinado da geração dispersa no seu interior, da flexibilidade oferecida pelos consumidores e do uso de reconfiguração. Este objetivo foi atingido através da implementação de uma estratégia de otimização multi-objetivo baseada no algoritmo "Simulated Annealing".

Esta abordagem permitiu determinar configurações que minimizam várias funções objetivo definidas, numa primeira fase numa ótica mono-objetivo de minimização da indisponibilidade de qualquer sub-rede criada por corte de uma ou duas das ligações pré-existentes, e numa segunda fase, procurando simultaneamente minimizar o custo associado ao investimento nas interligações adicionais que, numa situação de contingência, permitissem reestabelecer a alimentação, assim como a máxima energia não servida nessas circunstâncias. O processo implementado na rede usada como estudo de caso permite obter a solução ótima na perspetiva da indisponibilidade com 3 troços adicionais, que é simultaneamente a solução ótima na perspetiva da energia não servida já que corresponde a uma capacidade total da rede subsistir, fazendo uso da capacidade de produção local e da flexibilidade de cargas. De notar que na perspetiva do tempo de indisponibilidade, e com base nos pressupostos assumidos, não há vantagem em proceder a uma análise de contingência N-2 em termos de troços de rede já que qualquer sub-rede criada é igualmente analisada na análise de contingência N-1.

Numa perspectiva multi-objetivo, foi demonstrada a forma como um decisor real poderá analisar os resultados produzidos de modo a determinar a solução que melhor representa os compromissos entre objetivos que estará disposto a aceitar, não sendo assim possível identificar nenhuma solução que possa à partida satisfazer um decisor sem conhecer a sua estrutura de preferências. A aplicação do simulated annealing revelou-se suficiente em todos os casos, requerendo apenas uma experimentação inicial para a determinação dos parâmetros que proporcionassem resultados satisfatórios num tempo aceitável, o que no caso da abordagem multi-objetivo se traduziu na obtenção de um número razoável de soluções não dominadas e no atingir ou aproximar suficientemente das soluções ótimas previamente conhecidas para todos os objetivos.

5.1 Possibilidades de trabalho futuro

A abordagem seguida possui algumas limitações, algumas das quais assumidas desde o princípio, cuja correção poderá ser o alvo de trabalhos futuros sobre o tema.

Em primeiro lugar, o teste às novas soluções apenas determina a distância entre os nós interligados, embora majorada por não se considerar a localização geográfica dos nós mas sim a distância entre eles através das ligações pré-existentes, assumindo que o custo será no essencial proporcional a esta distância. Contudo, é possível que os troços pré-existentes da rede também tenham de ser reforçados dado o potencial incremento dos trânsitos de energia. Assim, um melhoramento potencial consistirá em avaliar igualmente esta necessidade de reforço e/ou estabelecer limites ao uso de certos troços pré-existentes.

Por outro lado, deve assinalar-se que não se entra em consideração com os aspetos dinâmicos da reconfiguração, cujo impacto pode impedir que uma microrrede se mantenha em funcionamento mesmo que a capacidade instalada o devesse permitir, nem com as implicações em termos de balanço de energia reativa, que podem afetar de forma séria as tensões disponibilizadas nos diferentes nós da rede.

Igualmente, o uso da flexibilidade foi aqui assumida como garantida em situações de contingência, sem lhe impor outros limites que não a potência pedida em cada instante pelas cargas consideradas flexíveis. Modelos mais elaborados poderão tentar incluir outro tipo de restrições temporais e incerteza que melhor entrem em consideração com a possível reação dos consumidores.

Relativamente aos métodos de otimização, embora o simulated annealing se tenha revelado suficiente, poderão ser testados outros métodos, nomeadamente para facilitar o processo de determinação dos sempre necessários parâmetros adicionais por um utilizador não experimentado.

Finalmente, a construção de um interface gráfico será certamente uma necessidade para possibilitar o uso fácil do procedimento criado.

BIBLIOGRAFIA

- [1] D. Elzinga. *Technology Roadmap: Smart Grids*. Technology report. International Energy Agency, 2011, p. 52. URL: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-smart-grids> (ver p. 1).
- [2] B. Shi e J. Liu. “Decentralized Control and Fair Load-Shedding Compensations to Prevent Cascading Failures in a Smart Grid”. Em: *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 67 (1 de mai. de 2015), pp. 582–590. ISSN: 0142-0615. DOI: [10.1016/j.ijepes.2014.12.041](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.12.041) (ver pp. 2, 6, 19).
- [3] H. Gao et al. “Resilience-Oriented Critical Load Restoration Using Microgrids in Distribution Systems”. Em: *IEEE Transactions on Smart Grid* 7.6 (nov. de 2016), pp. 2837–2848. ISSN: 1949-3061. DOI: [10.1109/TSG.2016.2550625](https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2550625) (ver pp. 2, 4, 7, 19).
- [4] M. S. Saleh et al. “Impact of Clustering Microgrids on Their Stability and Resilience during Blackouts”. Em: 2015 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE). Out. de 2015, pp. 195–200. DOI: [10.1109/ICSGCE.2015.7454295](https://doi.org/10.1109/ICSGCE.2015.7454295) (ver pp. 2, 5, 19).
- [5] B. Kroposki et al. “Making Microgrids Work”. Em: *IEEE Power and Energy Magazine* 6.3 (mai. de 2008), pp. 40–53. ISSN: 1540-7977, 1558-4216. DOI: [10.1109/MPE.2008.918718](https://doi.org/10.1109/MPE.2008.918718) (ver pp. 2, 5).
- [6] A. Fazeli et al. “Investigating the Effects of Dynamic Demand Side Management within Intelligent Smart Energy Communities of Future Decentralized Power System”. Em: 2011 2nd IEEE PES International Conference and

- Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies. Dez. de 2011, pp. 1–8. DOI: [10.1109/ISGTEurope.2011.6162619](https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2011.6162619) (ver p. 2).
- [7] R. M. V. Vitorino, H. M. M. Jorge e L. M. P. Neves. “Network Reconfiguration Using a Genetic Approach for Loss and Reliability Optimization in Distribution Systems”. Em: International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, POWERENG. 2009, p. 6. DOI: [10.1109/POWERENG.2009.4915219](https://doi.org/10.1109/POWERENG.2009.4915219) (ver pp. 4, 7).
- [8] Y. Xu et al. “Toward a Resilient Distribution System”. Em: 2015 IEEE Power Energy Society General Meeting. Jul. de 2015, pp. 1–5. DOI: [10.1109/PESGM.2015.7286551](https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7286551) (ver pp. 4, 5).
- [9] M. Panteli e P. Mancarella. “The Grid: Stronger, Bigger, Smarter?: Presenting a Conceptual Framework of Power System Resilience”. Em: *IEEE Power and Energy Magazine* 13.3 (mai. de 2015), pp. 58–66. ISSN: 1558-4216. DOI: [10.1109/MPE.2015.2397334](https://doi.org/10.1109/MPE.2015.2397334) (ver pp. 5, 7).
- [10] G. Strbac et al. “Microgrids: Enhancing the Resilience of the European Megagrid”. Em: *IEEE Power and Energy Magazine* 13.3 (mai. de 2015), pp. 35–43. ISSN: 1558-4216. DOI: [10.1109/MPE.2015.2397336](https://doi.org/10.1109/MPE.2015.2397336) (ver p. 5).
- [11] J. Li et al. “Distribution System Restoration With Microgrids Using Spanning Tree Search”. Em: *IEEE Transactions on Power Systems* 29.6 (nov. de 2014), pp. 3021–3029. ISSN: 0885-8950, 1558-0679. DOI: [10.1109/TPWRS.2014.2312424](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2312424) (ver p. 5).
- [12] X. Liu et al. “Microgrids for Enhancing the Power Grid Resilience in Extreme Conditions”. Em: *IEEE Transactions on Smart Grid* 8.2 (mar. de 2017), pp. 589–597. ISSN: 1949-3061. DOI: [10.1109/TSG.2016.2579999](https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2579999) (ver pp. 6, 7).
- [13] K. W. Hedman et al. “Co-Optimization of Generation Unit Commitment and Transmission Switching With N-1 Reliability”. Em: *IEEE Transactions on Power Systems* 25.2 (mai. de 2010), pp. 1052–1063. ISSN: 1558-0679. DOI: [10.1109/TPWRS.2009.2037232](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2037232) (ver p. 6).

- [14] A. Street, F. Oliveira e J. M. Arroyo. “Contingency-Constrained Unit Commitment With $\$n - K\$$ Security Criterion: A Robust Optimization Approach”. Em: *IEEE Transactions on Power Systems* 26.3 (ago. de 2011), pp. 1581–1590. ISSN: 1558-0679. DOI: [10.1109/TPWRS.2010.2087367](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2087367) (ver p. 6).
- [15] S. M. Nosratabadi, R.-A. Hooshmand e E. Gholipour. “A Comprehensive Review on Microgrid and Virtual Power Plant Concepts Employed for Distributed Energy Resources Scheduling in Power Systems”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67 (jan. de 2017), pp. 341–363. ISSN: 13640321. DOI: [10.1016/j.rser.2016.09.025](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.025) (ver p. 6).
- [16] R. Allan e R. Billinton. “Probabilistic Assessment of Power Systems”. Em: *Proceedings of the IEEE* 88.2 (fev. de 2000), pp. 140–162. ISSN: 0018-9219, 1558-2256. DOI: [10.1109/5.823995](https://doi.org/10.1109/5.823995) (ver p. 6).
- [17] S. D. Manshadi e M. E. Khodayar. “Resilient Operation of Multiple Energy Carrier Microgrids”. Em: *IEEE Transactions on Smart Grid* 6.5 (set. de 2015), pp. 2283–2292. ISSN: 1949-3061. DOI: [10.1109/TSG.2015.2397318](https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2397318) (ver pp. 7, 18).
- [18] H. H. Willis e K. Loa. *Measuring the Resilience of Energy Distribution Systems*. Research report. RAND Corporation, 24 de abr. de 2015. URL: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR883.html (ver p. 8).
- [19] A. Gholami et al. “Toward a Consensus on the Definition and Taxonomy of Power System Resilience”. Em: *IEEE Access* 6 (2018), pp. 32035–32053. ISSN: 2169-3536. DOI: [10.1109/ACCESS.2018.2845378](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2845378) (ver p. 8).
- [20] N. Suri e G. Cabri, eds. *Adaptive, Dynamic, and Resilient Systems*. 1st edition. Boca Raton: Auerbach Publications, 23 de jun. de 2014. 378 pp. ISBN: 978-1-4398-6848-5 (ver p. 8).
- [21] J. Chen, J. S. Thorp e I. Dobson. “Cascading Dynamics and Mitigation Assessment in Power System Disturbances via a Hidden Failure Model”. Em: *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 27.4 (1 de mai. de 2005), pp. 318–326. ISSN: 0142-0615. DOI: [10.1016/j.ijepes.2004.12.003](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2004.12.003) (ver p. 8).

- [22] C. Roldán-Blay, G. Escrivá-Escrivá e C. Roldán-Porta. “Improving the Benefits of Demand Response Participation in Facilities with Distributed Energy Resources”. Em: *Energy* 169 (15 de fev. de 2019), pp. 710–718. ISSN: 0360-5442. DOI: [10.1016/j.energy.2018.12.102](https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.102) (ver p. 9).
- [23] M. H. Albadi e E. F. El-Saadany. “A Summary of Demand Response in Electricity Markets”. Em: *Electric Power Systems Research* 78.11 (1 de nov. de 2008), pp. 1989–1996. ISSN: 0378-7796. DOI: [10.1016/j.epsr.2008.04.002](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.04.002) (ver p. 9).
- [24] A. Faruqui, D. Harris e R. Hledik. “Unlocking the €53 Billion Savings from Smart Meters in the EU: How Increasing the Adoption of Dynamic Tariffs Could Make or Break the EU’s Smart Grid Investment”. Em: *Energy Policy*. The Socio-Economic Transition towards a Hydrogen Economy - Findings from European Research, with Regular Papers 38.10 (1 de out. de 2010), pp. 6222–6231. ISSN: 0301-4215. DOI: [10.1016/j.enpol.2010.06.010](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.06.010) (ver p. 9).
- [25] B. Shen et al. “The Role of Regulatory Reforms, Market Changes, and Technology Development to Make Demand Response a Viable Resource in Meeting Energy Challenges”. Em: *Applied Energy* 130 (1 de out. de 2014), pp. 814–823. ISSN: 0306-2619. DOI: [10.1016/j.apenergy.2013.12.069](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.069) (ver p. 9).
- [26] M. Á. Lynch et al. “The Impacts of Demand Response Participation in Capacity Markets”. Em: *Applied Energy* 250 (15 de set. de 2019), pp. 444–451. ISSN: 0306-2619. DOI: [10.1016/j.apenergy.2019.05.063](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.063) (ver p. 9).
- [27] C. Goldenberg, M. Dyson e H. Masters. *Demand Flexibility: The Key to Enabling a Low-Cost, Low-Carbon Grid*. 2018. URL: https://rmi.org/wp-content/uploads/2018/02/Insight_Brief_Demand_Flexibility_2018.pdf (ver p. 9).
- [28] DOE. *Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations*. U.S. Department of Energy, 2006 (ver p. 10).
- [29] M. Jin et al. “Microgrid to Enable Optimal Distributed Energy Retail and End-User Demand Response”. Em: *Applied Energy* 210 (jan. de 2018), pp. 1321–

1335. ISSN: 03062619. DOI: [10.1016/j.apenergy.2017.05.103](#) (ver p. 10).
- [30] P. Faria e Z. Vale. “Demand Response in Electrical Energy Supply: An Optimal Real Time Pricing Approach”. Em: *Energy*. PRES 2010 36.8 (1 de ago. de 2011), pp. 5374–5384. ISSN: 0360-5442. DOI: [10.1016/j.energy.2011.06.049](#) (ver p. 10).
- [31] A. Al-Mulla e A. ElSherbini. “Demand Management through Centralized Control System Using Power Line Communication for Existing Buildings”. Em: *Energy Conversion and Management* 79 (1 de mar. de 2014), pp. 477–486. ISSN: 0196-8904. DOI: [10.1016/j.enconman.2013.12.011](#) (ver p. 10).
- [32] M. A. Zehir e M. Bagriyanik. “Demand Side Management by Controlling Refrigerators and Its Effects on Consumers”. Em: *Energy Conversion and Management*. IREC 2011, The International Renewable Energy Congress 64 (1 de dez. de 2012), pp. 238–244. ISSN: 0196-8904. DOI: [10.1016/j.enconman.2012.05.012](#) (ver p. 10).
- [33] D. Wang et al. “A Demand Response and Battery Storage Coordination Algorithm for Providing Microgrid Tie-Line Smoothing Services”. Em: *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 5.2 (abr. de 2014), pp. 476–486. ISSN: 1949-3037. DOI: [10.1109/TSTE.2013.2293772](#) (ver p. 10).
- [34] A. Mohsenian-Rad e A. Leon-Garcia. “Optimal Residential Load Control With Price Prediction in Real-Time Electricity Pricing Environments”. Em: *IEEE Transactions on Smart Grid* 1.2 (set. de 2010), pp. 120–133. ISSN: 1949-3061. DOI: [10.1109/TSG.2010.2055903](#) (ver p. 10).
- [35] A. Mohsenian-Rad et al. “Autonomous Demand-Side Management Based on Game-Theoretic Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid”. Em: *IEEE Transactions on Smart Grid* 1.3 (dez. de 2010), pp. 320–331. ISSN: 1949-3061. DOI: [10.1109/TSG.2010.2089069](#) (ver p. 10).
- [36] M. Mazidi et al. “Integrated Scheduling of Renewable Generation and Demand Response Programs in a Microgrid”. Em: *Energy Conversion and Management* 86 (1 de out. de 2014), pp. 1118–1127. ISSN: 0196-8904. DOI: [10.1016/j.enconman.2014.06.078](#) (ver p. 10).

- [37] The Cadmus Group LLC. *Demand Response Potential in Bonneville Power Administration's Public Utility Service Area*. Final Report. Bonneville Power Administration, 2019. URL: https://www.bpa.gov/EE/Technology/demand-response/Documents/190920_DR_Potential_Study_Consolidated_Report.pdf (ver p. 10).
- [38] A. Zakariazadeh, S. Jadid e P. Siano. "Smart Microgrid Energy and Reserve Scheduling with Demand Response Using Stochastic Optimization". Em: *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 63 (1 de dez. de 2014), pp. 523–533. ISSN: 0142-0615. DOI: [10.1016/j.ijepes.2014.06.037](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.06.037) (ver pp. 11, 17).
- [39] N. G. Paterakis, O. Erdinç e J. P. Catalão. "An Overview of Demand Response: Key-Elements and International Experience". Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69 (mar. de 2017), pp. 871–891. ISSN: 13640321. DOI: [10.1016/j.rser.2016.11.167](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.167) (ver pp. 11, 12).
- [40] R. Vitorino, H. Jorge e L. Neves. "Loss and Reliability Optimization for Power Distribution System Operation". Em: *Electric Power Systems Research* 96 (mar. de 2013), pp. 177–184. ISSN: 03787796. DOI: [10.1016/j.epsr.2012.11.002](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.11.002) (ver p. 12).
- [41] O. Badran et al. "Optimal Reconfiguration of Distribution System Connected with Distributed Generations: A Review of Different Methodologies". Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73 (jun. de 2017), pp. 854–867. ISSN: 13640321. DOI: [10.1016/j.rser.2017.02.010](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.010) (ver p. 12).
- [42] I. Ismail e N. Razali. "Enhancing Medium Voltage Electrical Network Configuration for the Golden Triangle of Kuala Lumpur Malaysia". Em: *2013 IEEE Student Conference on Research and Developement* (2013). DOI: [10.1109/SCORED.2013.7002571](https://doi.org/10.1109/SCORED.2013.7002571) (ver p. 13).
- [43] R. M. Vitorino, H. M. Jorge e L. P. Neves. "Multi-Objective Optimization Using NSGA-II for Power Distribution System Reconfiguration". Em: *International Transactions on Electrical Energy Systems* 25.1 (jan. de 2015), pp. 38–53. ISSN: 20507038. DOI: [10.1002/etep.1819](https://doi.org/10.1002/etep.1819) (ver p. 12).

- [44] E. Dall’Anese e G. B. Giannakis. “Sparsity-Leveraging Reconfiguration of Smart Distribution Systems”. Em: *IEEE Transactions on Power Delivery* 29.3 (jun. de 2014), pp. 1417–1426. ISSN: 1937-4208. DOI: [10.1109/TPWRD.2014.2302912](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2302912) (ver p. 13).
- [45] R. A. Jabr, R. Singh e B. C. Pal. “Minimum Loss Network Reconfiguration Using Mixed-Integer Convex Programming”. Em: *IEEE Transactions on Power Systems* 27.2 (mai. de 2012), pp. 1106–1115. ISSN: 1558-0679. DOI: [10.1109/TPWRS.2011.2180406](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2180406) (ver p. 13).
- [46] G. Gutiérrez-Alcaraz et al. “Renewable Energy Resources Short-Term Scheduling and Dynamic Network Reconfiguration for Sustainable Energy Consumption”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52 (1 de dez. de 2015), pp. 256–264. ISSN: 1364-0321. DOI: [10.1016/j.rser.2015.07.105](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.105) (ver p. 13).
- [47] S. Das, D. Das e A. Patra. “Reconfiguration of Distribution Networks with Optimal Placement of Distributed Generations in the Presence of Remote Voltage Controlled Bus”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73 (jun. de 2017), pp. 772–781. ISSN: 13640321. DOI: [10.1016/j.rser.2017.01.055](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.055) (ver p. 13).
- [48] R. Hasanpour et al. “Reconfiguration of Smart Distribution Network Considering Variation of Load and Local Renewable Generation”. Em: 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). Milan, Italy: IEEE, jun. de 2017, pp. 1–5. ISBN: 978-1-5386-3917-7. DOI: [10.1109/EEEIC.2017.7977556](https://doi.org/10.1109/EEEIC.2017.7977556) (ver pp. 13, 20).
- [49] S. Thakar, V. A.S. e S. Doolla. “System Reconfiguration in Microgrids”. Em: *Sustainable Energy, Grids and Networks* 17 (mar. de 2019), p. 100191. ISSN: 23524677. DOI: [10.1016/j.segan.2019.100191](https://doi.org/10.1016/j.segan.2019.100191) (ver p. 13).
- [50] M. O. W. Grond et al. “Multi-Objective Optimization Techniques and Applications in Electric Power Systems”. Em: 2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). Set. de 2012, pp. 1–6. DOI: [10.1109/UPEC.2012.6398417](https://doi.org/10.1109/UPEC.2012.6398417) (ver pp. 14, 15).

- [51] A. A. Bazmi e G. Zahedi. “Sustainable Energy Systems: Role of Optimization Modeling Techniques in Power Generation and Supply—A Review”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15.8 (1 de out. de 2011), pp. 3480–3500. ISSN: 1364-0321. DOI: [10.1016/j.rser.2011.05.003](https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.05.003) (ver p. 14).
- [52] M. I. R. Dolores. “Otimização da Localização de Sensores para a Detecção de Contaminantes em RAA”. Mestrado. Universidade de Coimbra, 2014 (ver pp. 15, 31, 32).
- [53] A. Gaspar-Cunha, R. Takahashi e C. H. Antunes. *Manual de computação evolutiva e metaheurística*. Imprensa da Universidade de Coimbra / Coimbra University Press, 1 de jun. de 2012. 466 pp. ISBN: 978-989-26-0150-2 (ver pp. 15, 30).
- [54] F. J. B. Pereira. “Algoritmos Genéticos”. Em: *Manual de computação evolutiva e metaheurística*. Imprensa da Universidade de Coimbra / Coimbra University Press, 2012 (ver p. 15).
- [55] M. A. Pereira e J. A. Vasconcelos. “Recozimento Simulado”. Em: *Manual de computação evolutiva e metaheurística*. Imprensa da Universidade de Coimbra / Coimbra University Press, 2012 (ver p. 15).
- [56] R. Poli, J. Kennedy e T. Blackwell. “Particle Swarm Optimization: An Overview”. Em: *Swarm Intelligence* 1.1 (17 de out. de 2007), pp. 33–57. ISSN: 1935-3812, 1935-3820. DOI: [10.1007/s11721-007-0002-0](https://doi.org/10.1007/s11721-007-0002-0) (ver p. 16).
- [57] M. J. F. Souza. “Busca Tabu”. Em: *Manual de computação evolutiva e metaheurística*. Imprensa da Universidade de Coimbra / Coimbra University Press, 2012 (ver p. 16).
- [58] P. V. Z. C. Goliatt, J. S. Angelo e H. J. C. Barbosa. “Colónia de Formigas”. Em: *Manual de computação evolutiva e metaheurística*. Imprensa da Universidade de Coimbra / Coimbra University Press, 2012 (ver p. 16).
- [59] P. A. D. de Castro e F. J. Von Zuben. “Algoritmos de Estimção de Distribuição”. Em: *Manual de computação evolutiva e metaheurística*. Imprensa da Universidade de Coimbra / Coimbra University Press, 2012 (ver p. 17).

- [60] A. Majzoobi e A. Khodaei. “Application of Microgrids in Supporting Distribution Grid Flexibility”. Em: *IEEE Transactions on Power Systems* 32.5 (set. de 2017), pp. 3660–3669. ISSN: 1558-0679. DOI: [10.1109/TPWRS.2016.2635024](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2635024) (ver p. 17).
- [61] N. Good e P. Mancarella. “Flexibility in Multi-Energy Communities With Electrical and Thermal Storage: A Stochastic, Robust Approach for Multi-Service Demand Response”. Em: *IEEE Transactions on Smart Grid* 10.1 (jan. de 2019), pp. 503–513. ISSN: 1949-3061. DOI: [10.1109/TSG.2017.2745559](https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2745559) (ver p. 17).
- [62] Z. Guo et al. “Resilient Configuration Approach of Integrated Community Energy System Considering Integrated Demand Response Under Uncertainty”. Em: *IEEE Access* 7 (2019), pp. 87513–87533. ISSN: 2169-3536. DOI: [10.1109/ACCESS.2019.2924828](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924828) (ver p. 17).
- [63] M. T. G. Jahani et al. “Multi-Objective Optimization Model for Optimal Reconfiguration of Distribution Networks with Demand Response Services”. Em: *Sustainable Cities and Society* 47 (mai. de 2019), p. 101514. ISSN: 22106707. DOI: [10.1016/j.scs.2019.101514](https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101514) (ver p. 18).
- [64] National Research Council. *Terrorism and the Electric Power Delivery System*. Washington, D.C.: National Academies Press, 25 de out. de 2012. 12050 pp. ISBN: 978-0-309-11404-2. DOI: [10.17226/12050](https://doi.org/10.17226/12050) (ver p. 18).
- [65] J. Salmeron, K. Wood e R. Baldick. “Analysis of Electric Grid Security under Terrorist Threat”. Em: *IEEE Transactions on Power Systems* 19.2 (mai. de 2004), pp. 905–912. ISSN: 1558-0679. DOI: [10.1109/TPWRS.2004.825888](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2004.825888) (ver p. 18).
- [66] D. Bienstock e S. Mattia. “Using Mixed-Integer Programming to Solve Power Grid Blackout Problems”. Em: *Discrete Optimization. Mixed Integer Programming* 4.1 (1 de mar. de 2007), pp. 115–141. ISSN: 1572-5286. DOI: [10.1016/j.disopt.2006.10.007](https://doi.org/10.1016/j.disopt.2006.10.007) (ver p. 18).
- [67] N. Romero et al. “Investment Planning for Electric Power Systems Under Terrorist Threat”. Em: *IEEE Transactions on Power Systems* 27.1 (fev. de 2012), pp. 108–116. ISSN: 1558-0679. DOI: [10.1109/TPWRS.2011.2159138](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2159138) (ver p. 18).

-
- [68] Y. Yao et al. “Trilevel Optimization in Power Network Defense”. Em: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* 37.4 (jul. de 2007), pp. 712–718. issn: 1558-2442. doi: [10.1109/TSMCC.2007.897487](https://doi.org/10.1109/TSMCC.2007.897487) (ver p. 18).
- [69] M. Khederzadeh e A. Beiranvand. “Identification and Prevention of Cascading Failures in Autonomous Microgrid”. Em: *IEEE Systems Journal* 12.1 (mar. de 2018), pp. 308–315. issn: 1932-8184, 1937-9234, 2373-7816. doi: [10.1109/JSYST.2015.2482227](https://doi.org/10.1109/JSYST.2015.2482227) (ver p. 20).
- [70] H. Bawayan e M. Younis. “Mitigating Failure Propagation in Microgrids through Topology Reconfiguration”. Em: *Sustainable Energy, Grids and Networks* 23 (set. de 2020), p. 100363. issn: 23524677. doi: [10.1016/j.segan.2020.100363](https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100363) (ver p. 20).
- [71] I. Richardson, M. Thomson e D. Infield. “A High-Resolution Domestic Building Occupancy Model for Energy Demand Simulations”. Em: *Energy and Buildings* 40.8 (1 de jan. de 2008), pp. 1560–1566. issn: 0378-7788. doi: [10.1016/j.enbuild.2008.02.006](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.006) (ver pp. 23–25, 38).
- [72] A. Suppapitnarm et al. “A Simulated Annealing Algorithm for Multiobjective Optimization”. Em: *Engineering Optimization* 33.1 (1 de nov. de 2000), pp. 59–85. issn: 0305-215X. doi: [10.1080/03052150008940911](https://doi.org/10.1080/03052150008940911) (ver p. 32).
- [73] S. Papathanassiou, N. Hatziargyriou e K. Strunz. “A Benchmark Low Voltage Microgrid Network”. Em: *CIGRE Symposium*. 1 de jan. de 2005 (ver pp. 36–39, 42).
- [74] J. M. Lourenço. *The NOVAthesis L^AT_EX Template User’s Manual*. NOVA University Lisbon. 2021. url: <https://github.com/joaomlourenco/novathesis/raw/master/template.pdf>.

DADOS DE SIMULAÇÃO DO MODELO DE RICHARDSON

Tabela I.1: Afetação dos diagramas de carga aos nós da rede de teste

Nó	Habitações
4	1
9	2 a 14
12	15 a 18
16	19
18	20 a 26

Tabela I.2: Afetação dos novos diagramas de carga aos nós da rede de teste

Nó	Habitações
9	27 e 28
12	29 a 32
18	33 e 34

Tabela I.3: Dados de simulação com 26 habitações

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Number of Residents	4	4	5	4	5	4	1	2	3
	Weekday (wd) or Weekend (we)?	wd	wd	wd	wd	wd	wd	wd	wd	wd
	Month of the year	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Cold	Chest freezer	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	Fridge freezer	NO	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Refrigerator	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	Upright freezer	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Consumer	Answer machine	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Electronics +	Cassette / CD Player	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
ICT	Clock	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Cordless telephone	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Hi-Fi	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Iron	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Vacuum	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Fax	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	Personal computer	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Printer	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	TV 1	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	TV 2	YES	YES	YES	YES	YES	YES	NO	NO	YES
	TV 3	YES	YES	YES	YES	YES	YES	NO	NO	NO
	VCR / DVD	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	TV Receiver box	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Cooking	Hob	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Oven	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Microwave	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Kettle	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Small cooking (group)	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Wet	Dish washer	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Tumble dryer	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	Washing machine	YES	NO	NO	NO	NO	NO	YES	YES	YES
	Washer dryer	NO	YES	YES	YES	YES	YES	NO	NO	NO
Water heating	DESWH	NO	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	E-INST	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	Electric shower	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Electric Space	Storage heaters	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Heating	Other electric space heating	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Lighting	Lighting	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES

ANEXO I. DADOS DE SIMULAÇÃO DO MODELO DE RICHARDSON

		10	11	12	13	14	15	16	17	18
	Number of Residents	1	2	3	1	2	4	5	4	5
	Weekday (wd) or Weekend (we)?	wd	wd	wd	wd	wd	wd	wd	wd	wd
	Month of the year	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Cold	Chest freezer	NO	NO	NO	NO	NO	YES	YES	YES	YES
	Fridge freezer	YES	YES	YES	YES	YES	NO	NO	NO	NO
	Refrigerator	NO	NO	NO	NO	NO	YES	YES	YES	YES
	Upright freezer	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Consumer	Answer machine	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Electronics +	Cassette / CD Player	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
ICT	Clock	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Cordless telephone	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Hi-Fi	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Iron	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Vacuum	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Fax	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	Personal computer	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Printer	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	TV 1	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	TV 2	NO	NO	YES	NO	NO	YES	YES	YES	YES
	TV 3	NO	NO	NO	NO	NO	YES	YES	YES	YES
	VCR / DVD	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	TV Receiver box	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Cooking	Hob	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Oven	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Microwave	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Kettle	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Small cooking (group)	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Wet	Dish washer	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Tumble dryer	NO	NO	NO	NO	NO	YES	YES	YES	YES
	Washing machine	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Washer dryer	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Water heating	DESWH	YES	YES	YES	YES	YES	NO	NO	NO	NO
	E-INST	NO	NO	NO	NO	NO	YES	YES	YES	YES
	Electric shower	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Electric Space	Storage heaters	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Heating	Other electric space heating	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Lighting	Lighting	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES

		19	20	21	22	23	24	25	26
	Number of Residents	4	5	1	2	3	1	2	3
	Weekday (wd) or Weekend (we)?	wd	wd	wd	wd	wd	wd	wd	wd
	Month of the year	2	2	2	2	2	2	2	2
Cold	Chest freezer	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	Fridge freezer	NO	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Refrigerator	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	Upright freezer	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Consumer	Answer machine	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Electronics +	Cassette / CD Player	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
ICT	Clock	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Cordless telephone	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Hi-Fi	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Iron	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Vacuum	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Fax	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	Personal computer	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Printer	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	TV 1	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	TV 2	YES	YES	NO	NO	YES	NO	NO	YES
	TV 3	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	VCR / DVD	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	TV Receiver box	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Cooking	Hob	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Oven	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Microwave	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Kettle	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Small cooking (group)	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Wet	Dish washer	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Tumble dryer	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	Washing machine	YES	NO	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Washer dryer	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Water heating	DESWH	NO	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	E-INST	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	Electric shower	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Electric Space	Storage heaters	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Heating	Other electric space heating	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Lighting	Lighting	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES

Tabela I.4: Dados de simulação das 8 habitações extra

		27	28	29	30	31	32	33	34
	Number of Residents	4	5	4	5	4	5	4	5
	Weekday (wd) or Weekend (we)?	wd	wd	wd	wd	wd	wd	wd	wd
	Month of the year	2	2	2	2	2	2	2	2
Cold	Chest freezer	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	Fridge freezer	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Refrigerator	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	Upright freezer	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Consumer	Answer machine	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Electronics +	Cassette / CD Player	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
ICT	Clock	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Cordless telephone	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Hi-Fi	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Iron	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Vacuum	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Fax	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	Personal computer	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Printer	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	TV 1	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	TV 2	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	TV 3	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	VCR / DVD	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	TV Receiver box	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Cooking	Hob	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Oven	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Microwave	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Kettle	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Small cooking (group)	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Wet	Dish washer	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	Tumble dryer	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	Washing machine	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	Washer dryer	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Water heating	DESWH	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	E-INST	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	Electric shower	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Electric Space	Storage heaters	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Heating	Other electric space heating	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Lighting	Lighting	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES

ROTINAS MATLAB

Serve o presente anexo para listar e descrever todas as rotinas desenvolvidas em MATLAB no âmbito da dissertação. Todas as rotinas aqui descritas foram guardadas numa diretoria que contém os ficheiros excel gerados através do modelo de Richardson (nomeados *CasaN.xlsm*, sendo *N* o número corresponde à residência). Esta diretoria contém também os ficheiros excel *Timeseries_2016.xlsx* e *ProdVerificadaElectr.xls*.

II.1 Descrição das rotinas

II.1.1 Preparação de dados

II.1.1.1 `criamatrizes.m`

A função `criamatrizes()` cria as matrizes *diag_carga* e *diag_flex* a partir dos ficheiros *Casa*.xlsm* existentes na diretoria, processo demorado pelo que estas são gravadas no ficheiro *diagramas.mat*, sendo apenas necessário correr essa função se for acrescentado ou alterado algum dos ficheiros com o modelo de Richardson. Esta função usa as funções:

- `geradiagramas()`
- `geradiagramas_flex()`

II.1.1.2 geradiagramas.m

A função *geradiagramas()* gera uma matriz de diagramas de carga a partir dos ficheiros *Casa*.xism* existentes na diretoria. A rotina agrega a coluna “Total Dwelling Power Demand (W)” da página *appliance_sim_data* dos diferentes ficheiros.

II.1.1.3 geradiagramas_flex.m

A função *geradiagramas_flex()* gera uma matriz de diagramas de carga flexível a partir dos ficheiros *Casa*.xism* existentes na diretoria. A rotina agrega as colunas AF a AN que corresponde às cargas consideradas flexíveis, nomeadamente as máquinas de lavar, o aquecimento de águas sanitárias e o aquecimento ambiente.

II.1.1.4 prep_producao.m

A função *[pv,eolica]=prep_producao(dia, mes, bissexto, sat)* produz os diagramas de produção renovável (*pv* e *eolica*) em Watts, definindo o dia e mês, o tipo de ano bissexto=TRUE|FALSE e o nível de saturação [0..1], ou seja a parcela do ano durante a qual a potência da turbina está no máximo. Os diagramas *pv* e *eolica* são guardados no ficheiro *producao.mat*. Só é necessário correr esta função de novo se se quiser alterar estes diagramas. Esta função usa as funções:

- *diagrama_solar()* - Obtém o diagrama PV a partir do ficheiro excel PVGIS
- *diagrama_vento()* - Obtém o diagrama eolico a partir do ficheiro da REN
- *normaliza_sat(diagramaannual, saturation, max_power)*
- *escolhe_dia(diagramaannual, dia, mes, bissexto)*
- *converte24_1440(diag_24)*

II.1.1.5 diagrama_solar.m

A função *diagrama_solar()* recorre ao ficheiro excel *Timeseries_2016.xlsx* para criar um diagrama de produção fotovoltaica anual para um painel fotovoltaico de 1000W.

II.1.1.6 diagrama_vento.m

A função *diagrama_vento()* recorre ao ficheiro excel *ProdVerificadaElectr.xls* para criar um diagrama de produção eólica anual em MW.

II.1.1.7 normaliza_sat.m

A função $p = \text{normaliza_sat}(aux, saturation, max_power)$ escala o diagrama de produção eólica para a potência pretendida, impondo o nível de saturação desejado, de forma a aproximar-se do comportamento de uma turbina isolada.

II.1.1.8 escolhe_dia.m

A função $d = \text{escolhe_dia}(diagrama, dia, mes, bissexto)$ obtém o diagrama de um dia específico a partir de um diagrama de 8760 (ano comum) ou 8784 horas (ano bissexto).

II.1.1.9 converte24_1440.m

A função $diag_1440 = \text{converte24_1440}(diag_24)$ transforma um diagrama de 24 horas (*diag_24*) num diagrama de 1440 minutos usando interpolação. O vetor dado como argumento pode ter 25 horas, incluindo assim a primeira hora do dia seguinte para permitir a interpolação da última hora do dia. No caso do vetor apenas ter 24 valores, a rotina assume que a vigésima quinta hora é igual à primeira.

II.1.1.10 inicializacao.m

A função *inicializacao()* é a função que prepara todo o ambiente necessário à realização da otimização, nomeadamente a criação das variáveis globais, a preparação dos dados, a criação do grafo, o cálculo das distâncias entre nós e uma definição inicial das funções objetivo a considerar na análise multi-objetivo, através da definição da variável *faval*. A variável *faval* é um vetor com o conjunto dos objetivos (1: indisponibilidade, 2: custo, 3: energia não servida). Esta função usa a função:

- *preparados()*

II.1.1.11 **preparadados.m**

A função *preparadados()* é a função que define a rede, lendo os diagramas de carga e produção, definindo a lista de troços de rede, e fazendo as atribuições de diagramas aos nós da rede. Qualquer alteração implica re-escrever parcialmente esta função. Esta função usa a função:

- *agregaCargas* (diagramas, nos, corresp)

II.1.1.12 **agregaCargas.m**

A função *agregacao_cargas = agregaCargas(diagramas, nos, corresp)* cria uma matriz de cargas agregadas para um conjunto de nós, de acordo com as correspondências definidas no vetor *corresp*. O argumento *diagramas* é uma matriz com os diagramas individuais de carga a agregar. O argumento *nos* é o número de nós agregados.

II.1.1.13 **agrega_cargas_orig.m**

A função *[agregacao_cargas, nos_carga] = agrega_cargas_orig(diagramas)* cria a matriz de cargas agregadas de acordo com a especificação original da rede de teste, com 26 habitações. O argumento *diagramas* é uma matriz com os diagramas individuais de carga a agregar.

II.1.2 **Rotinas de Otimização**

II.1.2.1 **sa.m**

A função *[x, objetivo, tempos] = sa(T0, dec, passos, n, contingencia, grafo)* realiza o Simulated Annealing para minimização da indisponibilidade, especificando a temperatura inicial *T0*, o fator de decaimento *dec*, o nº de passos de repetição, o nº de troços a acrescentar (*n*), o tipo de contingência (1 ou 2) e o grafo com a rede. A função devolve a melhor solução (*x*), o valor da função objetivo final e o vetor com a evolução do objetivo ao longo das iterações (*tempos*). Esta função usa as funções:

- *gera_solucao*(grafo, n_switches)
- *avaliaindisp*(solucao, k)

II.1.2.2 gera_solucão.m

A função $solucão = gera_solucão(grafo, n_switches)$ gera uma solução aleatória para o problema consistindo num vetor com um máximo de troços adicionais igual a $n_switches$ (parâmetro da função). A função assume uma probabilidade 50% de gerar ou não cada um dos possíveis ramos adicionais gerados através da função:

- ramo_aleatorio(grafo)

II.1.2.3 ramo_aleatorio.m

A função $[origem, destino, grafo] = ramo_aleatorio(grafo)$ usa o grafo que representa a rede em estudo para definir aleatoriamente um possível ramo adicional.

II.1.2.4 avalia_indisp.m

A função $[indisp, ens] = avalia_indisp(solucão, k)$ avalia o maior tempo de indisponibilidade de qualquer sub-rede criada com todas as possíveis contingências $n - k$ criadas a partir do corte simultâneo de k linhas da rede aumentada com a solução, e em simultâneo avalia a energia não servida (ens) correspondente ao somatório das ens em cada sub-rede criada com cada contingência. Esta função usa a função:

- estudosiliencia(troco_z, carga, p_flexivel, k)

II.1.2.5 estudosiliencia.m

A função $[tempo, energia, subrede, uso_flexivel] = estudosiliencia(troco_z, carga, p_flexivel, k)$ testa todas as contingências de tipo $N - k$ com corte de linhas numa rede definida através de uma lista de troços, com uma matriz correspondente aos diagramas de cada um dos nós da rede, uma matriz com os diagramas de flexibilidade de cada nó ($p_flexivel$) e sendo k o número de contingências. O estudo da resiliência de cada sub-rede é efetuado pela função:

- estuda_subrede(troco_z, carga, edge1, p_flexivel)

II.1.2.6 *estuda_subrede.m*

A função $[minutos, ens, uso_flexivel] = estuda_subrede(trocos, d_cargas, edge, p_flexivel)$ analisa a resiliência de todas as sub-redes geradas pelo corte de um conjunto de troços fornecido como parâmetro (*edge*). O estudo analisa a capacidade das sub-redes suportarem a sua carga exclusivamente com a geração local e a potência flexível disponível. O argumento *d_cargas* é uma matriz que define a potência pedida ao longo do tempo por cada nó, já descontada da produção local. O parâmetro *edge* especifica o(s) troço(s) cujo corte se pretende testar e o argumento *p_flexivel* é uma matriz que define em cada nó e para cada instante de tempo, a soma das potências em cargas flexíveis. Esta função usa a função:

- *indisponibilidade(d_cargas, p_flexivel)*

II.1.2.7 *indisponibilidade.m*

A função $[minutos, ens, uso_flexivel] = indisponibilidade(d_cargas, p_flexivel)$ determina o tempo de indisponibilidade correspondente à soma dos minutos em que a geração local e a potência flexível não são suficientes para permitir o equilíbrio oferta-procura. Calcula igualmente a energia não servida correspondente, assim como a potência flexível efetivamente usada. O argumento *d_cargas* é uma matriz que define a potência pedida ao longo do tempo por cada nó, já descontada da produção local. O parâmetro *p_flexivel* é uma matriz que define em cada nó e para cada instante de tempo, a soma das potências em cargas flexíveis.

II.1.2.8 *MOSA.m*

A função $[nao_dominadas, iteracao, T, Time] = MOSA(Tmax, decaimento, fator_T, n_passos, paragem, grafo, S_inicial, n_switches, contingencia)$ executa o simulated annealing multi-objetivo especificando a temperatura inicial *T0*, a função de decaimento (1|função proporcional ou 2|função exponencial), o fator de decaimento, o número de passos de repetição, o valor de temperatura que define a paragem, o grafo com a rede, a solução inicial, o número de troços adicionais e o tipo de contingência (1 ou 2). Esta função usa as funções:

- *avaliacaoMO(dados, nswitches, contingencia)*
- *solucao_vizinha(solucao_inicial, grafo, n_switches)*

- `domina(a,b)`
- `compara_e_arquiva(solucao,nao_dominadas)`
- `probabilidade2(a,b,T)`

II.1.2.9 `avaliacaoMO.m`

A função `sol=avaliacaoMO(dados, nswitches, contingencia)` faz a avaliação de cada solução de acordo com os objetivos a avaliar, indicados pela variável global `faval`. Esta função usa as funções:

- `avaliaindisp(solucao, k)`
- `avaliacusto(solucao)`

II.1.2.10 `avaliacusto.m`

A função `valor=avaliacusto(solucao)` avalia o “custo” de uma determinada solução, definido como o somatório das distâncias entre cada par de nós da solução através da rede pré-existente, usando a variável global `distancias` que possui as distâncias determinadas entre cada par de nós através de um algoritmo de caminho mais curto.

II.1.2.11 `solucao_vizinha.m`

A função `solucao = solucao_vizinha(solucao_inicial, grafo, n_switches)` atribui igual probabilidade à adição, remoção ou alteração de um dos troços adicionais que compõem a solução. A adição ou alteração usa a função:

- `ramo_aleatorio(grafo)`

II.1.2.12 `domina.m`

A função `resultado=domina(a,b)` verifica se uma solução *a* domina uma solução *b* ou seja, se *a* é pelo menos tão boa quanto *b* em todos os objetivos. Usa a variável global `faval` para saber quantos objetivos devem ser avaliados.

II.1.2.13 **compara_e_arquiva (solucao, nao_dominadas)**

A função *compara_e_arquiva (solucao, nao_dominadas)* encontra-se definida no ficheiro *MOSA.m*. Esta função verifica se uma solução pode pertencer ao conjunto das soluções não-dominadas e em caso afirmativo guarda-a nesse conjunto.

II.1.2.14 **probabilidade2 (a, b, T)**

A função *probabilidade2 (a, b, T)* encontra-se definida no ficheiro *MOSA.m*. Esta função calcula a probabilidade de aceitação de uma solução dominada em função da temperatura e dos critérios a avaliar, definidos pela variável global *faval*.

II.1.3 **Análise de resultados**

II.1.3.1 **obtemarvore.m**

A função *tree= obtemarvore (trocos, solucao, corte)* obtém a árvore de custo mínimo na rede acrescida dos troços indicados na solução (especificada como um vetor com os 2n nós, colocados como pares, sujeita a um corte num troço especificado como um vetor [no inicial no final]).

II.1.3.2 **avalia_usoflex.m**

A função *[minutos, ens, uso_flexivel] = avalia_usoflex (trocos, solucao, d_cargas, edge, p_flexivel)* é usada para produzir um gráfico de utilização da carga flexível ao longo do tempo por uma rede radial definida por um conjunto de troços à qual é acrescentada um conjunto de troços adicionais (*trocos*) definido pela solução (*solucao*). O argumento *d_cargas* é uma matriz que define a potência pedida ao longo do tempo por cada nó, já descontada da produção local. O parâmetro *edge* especifica o(s) troço(s) cujo corte se pretende testar e o argumento *p_flexivel* é uma matriz que define em cada nó e para cada instante de tempo, a soma das potências em cargas flexíveis. Esta função usa a função:

- *indisp_minuto (d_cargas, p_flexivel)*

II.1.3.3 *indisp_minuto.m*

A função $[minutos, ens, uso_flexivel] = indis_minuto(d_cargas, p_flexivel)$ é idêntica à função *indisponibilidade(...)* mas devolve um vetor com os valores de indisponibilidade, energia não servida e uso da flexibilidade, ao longo do tempo. O argumento d_cargas é uma matriz que define a potência pedida ao longo do tempo por cada nó, já descontada da produção local. O parâmetro $p_flexivel$ é uma matriz que define em cada nó e para cada instante de tempo, a soma das potências em cargas flexíveis.

II.1.3.4 *plotsurface.m*

A função $plotsurface(x,y,z)$ representa uma superfície tridimensional a partir de três vetores de igual dimensão que definem as coordenadas x, y e z dos pontos que definem essa superfície.

II.2 Guia de utilização

Este guia de utilização presume a existência de uma diretoria (fig: II.1) que contém todos os ficheiros *Casa*.xslm* correspondentes aos modelos de Richardson aplicados a cada habitação, o ficheiro *ProdVerificadaElectr.xls* obtido a partir do site da REN com a produção nacional de energia, e o ficheiro *Timeseries_2016.xlsx* obtido a partir do PVGIS com a produção fotovoltaica para um painel de 1000W no ano de 2016.

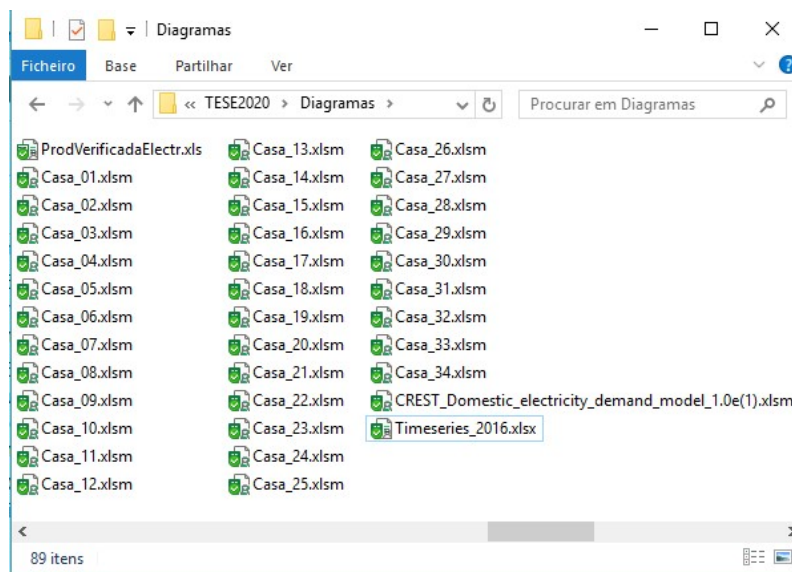


Figura II.1: Diretoria com os ficheiros de dados base

II.2.1 Preparação de dados

O primeiro passo consiste na execução da função *criamatrizes()* para criar os diagramas de carga total e carga flexível (*diag_carga* e *diag_flex*). Estes diagramas são guardados no ficheiro *diagramas.mat* pelo que só é necessário executá-la uma vez.

```
>> criamatrizes();
```

De seguida, é necessário executar a função *prep_producao(...)* para criar os diagramas de produção renovável (*pv* e *eolica*). De notar que embora a função possa devolver imediatamente os vetores correspondentes aos dois tipos de produção, também os grava no ficheiro *producao.mat* que será usado posteriormente.

```
>> prep_producao (22, 2, true, 0.5);
```

Tendo os ficheiros *diagramas.mat* e *producao.mat* na diretoria, o processo pode então iniciar-se através da função *inicializacao()* cujo resultado é a criação das diferentes variáveis necessárias ao processo, visíveis no lado esquerdo da figura II.2.

```
>> inicializacao();
```

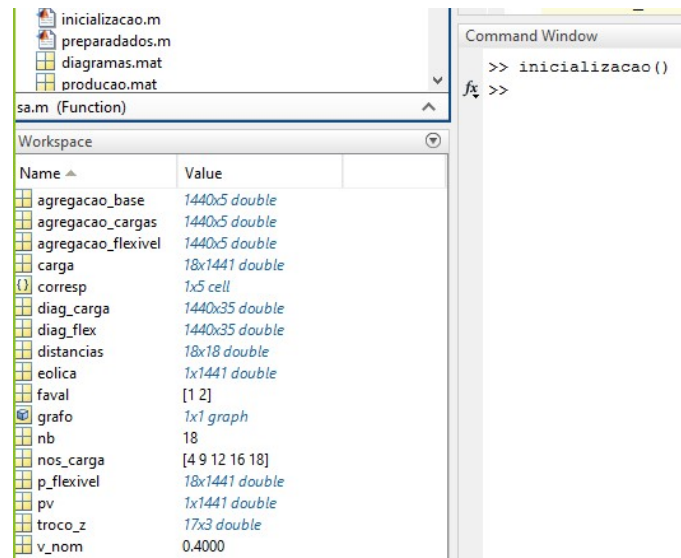


Figura II.2: Resultados da execução da função *inicializacao()*

Para ilustrar os resultados, é possível, por exemplo, obter os diagramas de carga agregados por nó (fig: II.3) introduzindo na linha de comandos:

```
>> plot (agregacao_cargas/1000)
>> plot (agregacao_flexivel/1000)
```

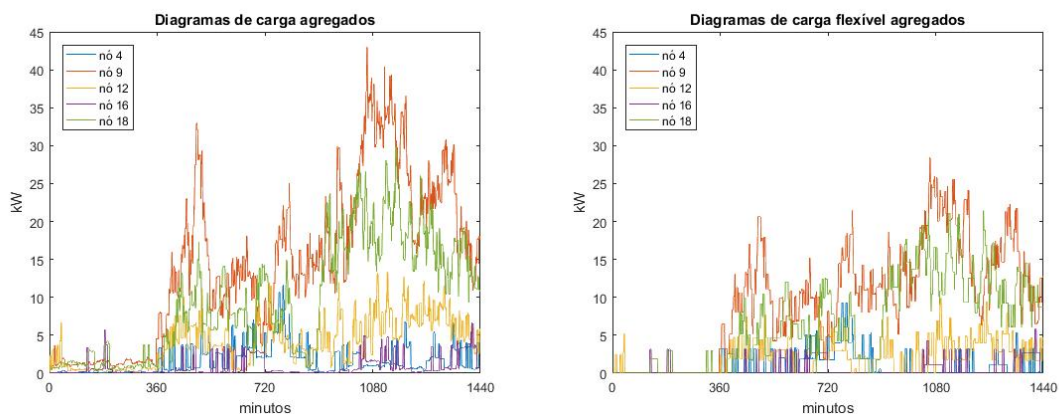


Figura II.3: Agregação de cargas residenciais por nó ao longo de um dia

É também possível obter uma representação do potencial de produção, carga e flexibilidade disponível (fig: II.4) multiplicando os diagramas de produção renovável pelas potências respectivas e somando a potência disponível na microturbina e na *fuel cell*, como ilustrado a seguir.

```
>> consumo = sum(agregacao_cargas,2)/1000;  
>> flexivel = sum(agregacao_flexivel,2)/1000;  
>> producao = pv*13/1000 + eolica*10/1000 + 15 + 5;  
>> producao = producao(1:1440)';  
>> plot([consumo, flexivel, producao]);
```

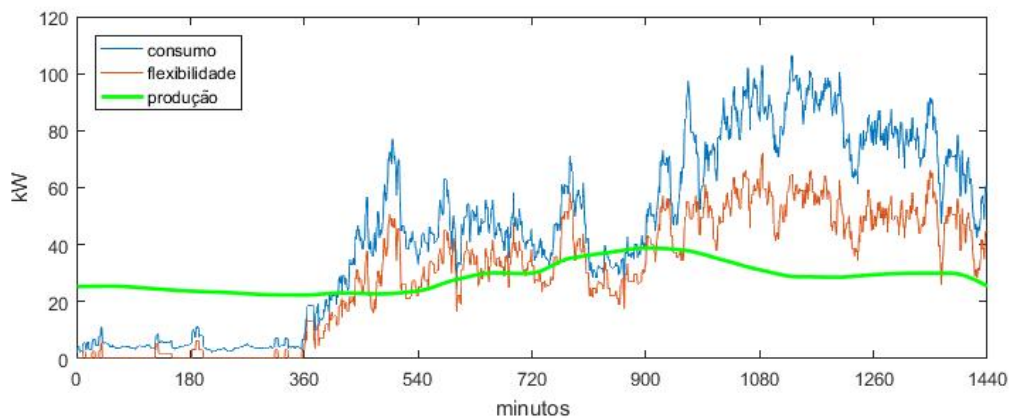


Figura II.4: Representação de potencial de produção, carga e flexibilidade

De notar que qualquer outro conjunto de dados ou alterações à configuração da rede, implicam que as rotinas executadas até aqui sejam modificadas. Todos os procedimentos descritos a partir deste ponto podem ser aplicados a qualquer conjunto de dados desde que respeite as definições de variáveis.

II.2.2 Estudo de resiliência

Para efetuar um teste de resiliência da rede, calculam-se as disponibilidades temporais das sub-redes isoladas resultantes do corte de cada um dos troços. O resultado (fig: II.5) pode ser representado através de um gráfico do tipo *stem*. Da mesma forma se pode representar a energia não servida por perda total de carga ou corte seletivo (flexibilidade) que resulta de cada um dos casos.

```
>> [tempo, energia, subrede, uso_flexivel]=
        estudoresiliencia(troco_z, carga, p_flexivel, 1);
>> stem([1:17], 1440-tempo)
>> bar(energia)
```

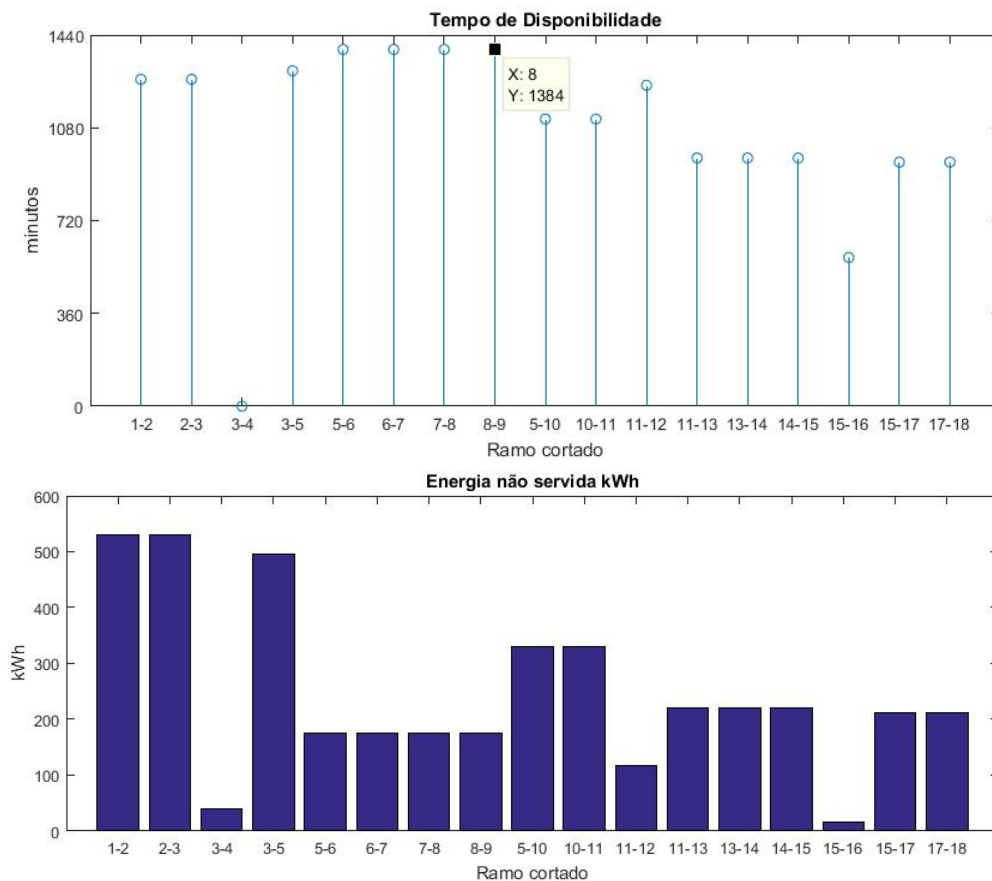


Figura II.5: Resultados do teste de resiliência

Para determinar o conjunto de troços a adicionar que permitem minimizar o tempo de indisponibilidade por reconfiguração da rede, executa-se o procedimento de otimização com *simulated annealing* como indicado a seguir, neste caso assumindo uma temperatura inicial $T_0 = 50$, um fator de decaimento $\alpha=0.2$, 20 passos, uma solução com até 3 troços adicionais e uma análise de contingência simples. Na figura II.6 é possível observar a evolução da função objetivo em função do número de iterações ao longo do processo de otimização.

```
>> [x,objetivo, tempos]= sa (50, 0.2, 20, 3, 1, grafo)
>> plot(tempos)
```

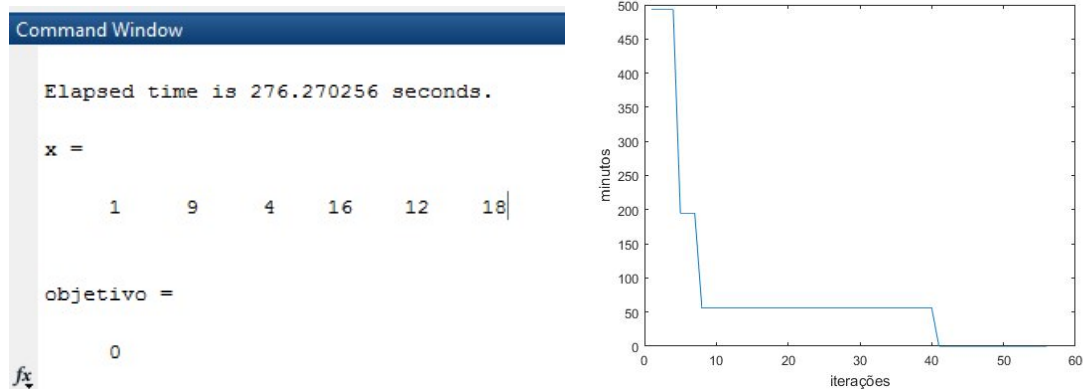


Figura II.6: Output do função *sa(...)*

Para aplicar um processo de otimização multi-objetivo ao problema é preciso em primeiro lugar definir o conjunto de objetivos a otimizar, através da variável global *faval*. De notar que esta variável é inicializada com [1,2] correspondendo assim a uma abordagem bi-objetivo que pretende minimizar a indisponibilidade e o custo, mas pode a qualquer momento ser redefinida com outro conjunto [1,3], [2,3] ou [1,2,3]. Este procedimento requer assim a execução da função *MOSA(...)* tal como descrito a seguir. O resultado consiste numa frente de soluções não-dominadas que pode ser representada através da instrução *scatter* (fig: II.7).

```
>> [nao_dominadas, iteracao, T, Time]=
      MOSA(50,2,0.2,20,0.001, grafo,[1 16 4 9 12 18], 3, 1)
>> scatter([nao_dominadas.indisponibilidade], [nao_dominadas.custo])
```

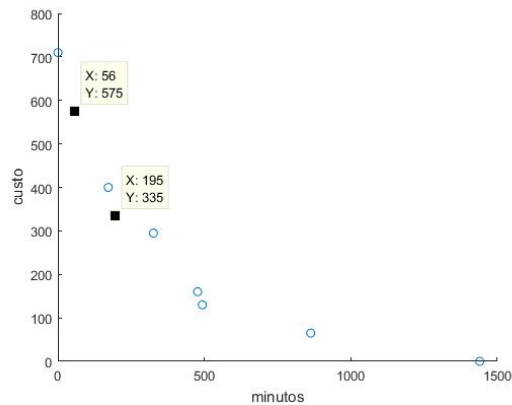


Figura II.7: Conjunto de soluções não dominadas, abordagem bi-objetivo

De notar que para melhor explorar o espaço de soluções e nomeadamente aproximar as soluções ótimas segundo cada um dos objetivos, pode ser conveniente adotar um fator de decaimento menor, por exemplo 0.04, e um número de passos maior, por exemplo 25.

No caso de uma otimização tri-objetivo, as funções a usar para visualização poderão ser a *stem3* ou a *plotsurface(...)* (fig: II.8).

```
>> faval = [1,2,3];
>> [nao_dominadas,iteracao,T,Time]=
      MOSA(50,2,0.2,20,0.001, grafo,[1 16 4 9 12 18], 3, 1);
>> stem3([nao_dominadas.indisponibilidade],
          [nao_dominadas.custo],[nao_dominadas.ens])
```

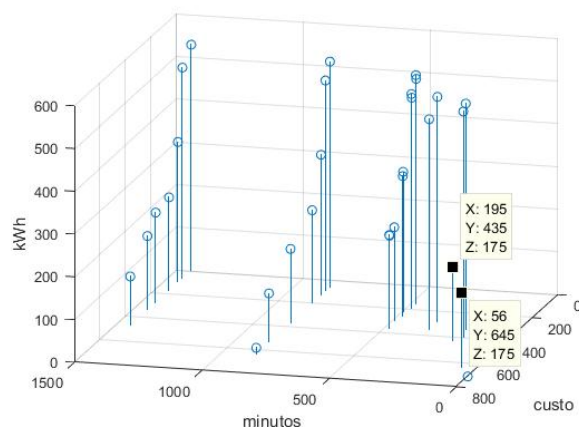


Figura II.8: Representação tri-dimensional

Por exemplo, para combinar a superfície com a representação das soluções individuais (fig: II.9), poderá usar o conjunto de instruções seguinte.

```
>> hold on
>> plotsurface([nao_dominadas.indisponibilidade]',
               [nao_dominadas.custo]',[nao_dominadas.ens]')
>> scatter3([nao_dominadas.indisponibilidade],
            [nao_dominadas.custo],[nao_dominadas.ens], 'filled')
>> hold off
```

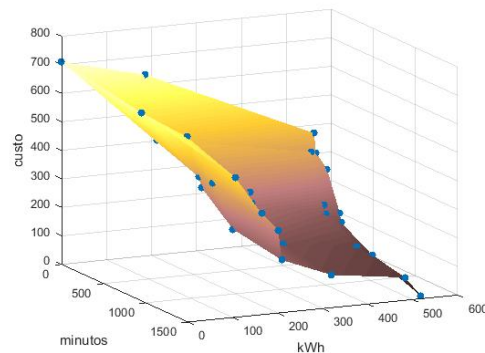


Figura II.9: Representação através de uma superfície geométrica

Escolhendo uma solução a implementar é possível agora obter a configuração radial mais apropriada para responder ao corte de um determinado troço utilizando a função *obtemarvore(...)*. A variável resultante contém todas as sub-redes que podem resultar de um determinado corte como ilustrado na figura II.10.

```
>> tree=obtemarvore(troco_z,[1 11 4 18 12 16],[5 6])
```

tree				
tree[1, 2]				
	1	2	3	4
1	6	7	35	
2	7	8	35	
3	8	9	30	
4				
5				

Figura II.10: Árvore de menor custo

Por fim, para visualizar a evolução da utilização de carga flexível ao longo do tempo para tentar garantir a subsistência da rede (fig: II.11), pode usar-se a função *avalia_usoflex(...)*.

```
>> [minutos, ens, uso_flexivel] =  
avalia_usoflex(troco_z, [1 11 4 18 12 16], carga, [5 6], p_flexivel)  
>> plot([1:1440]',[ens', (ens-uso_flexivel)'])
```

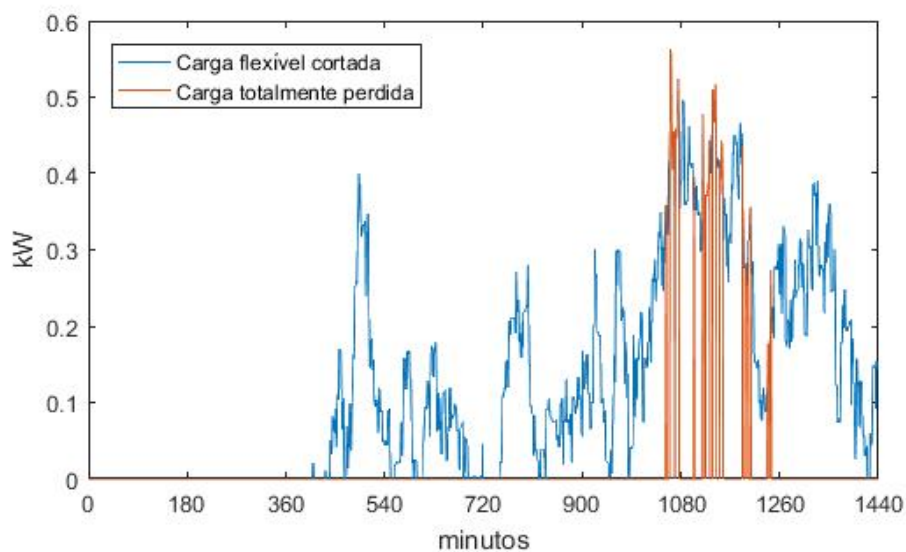


Figura II.11: Energia não servida para um corte no troço 5 – 6 na solução [1 – 11 4 – 18 12 – 16]

