

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA – CCET
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ELETRICIDADE-DEEE
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MAGDA DOS SANTOS PEREIRA

OPERAÇÃO DE MICRORREDES INTELIGENTES

São Luís

2018

MAGDA DOS SANTOS PEREIRA

OPERAÇÃO DE MICRORREDES INTELIGENTES

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Ronald Saavedra Mendez.

Coorientador: Prof. Dr. Denisson Queiroz Oliveira

São Luís

2018

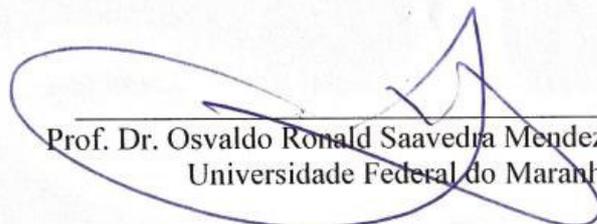
MAGDA DOS SANTOS PEREIRA

OPERAÇÃO DE MICRORREDES INTELIGENTES

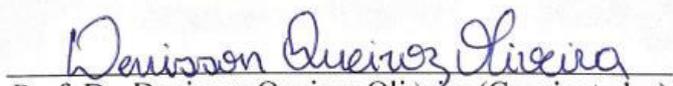
Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 19/12/2018

BANCA EXAMINADORA



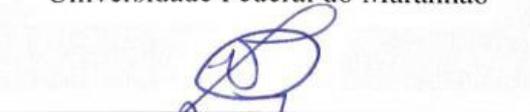
Prof. Dr. Osvaldo Ronald Saavedra Mendez (Orientador)
Universidade Federal do Maranhão



Prof. Dr. Denisson Queiroz Oliveira (Coorientador)
Universidade Federal do Maranhão



Prof. Dr. Silvangelia Lilian da Silva Lima Barcelos
Universidade Federal do Maranhão



Prof. Dr. Vicente Leonardo Paucar Casas
Universidade Federal do Maranhão

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

dos Santos Pereira, Magda.

OPERAÇÃO DE MICRORREDES INTELIGENTES / Magda dos Santos Pereira. - 2018.

80 f.

Coorientador(a): Denisson Queiroz Oliveira.

Orientador(a): Osvaldo Ronald Saavedra Mendez.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão, Universidade Federal do Maranhão, 2018.

1. Geração Distribuída. 2. Microrredes. 3. Multi-Microrredes. 4. Operação Resiliente. I. Queiroz Oliveira, Denisson. II. Ronald Saavedra Mendez, Osvaldo. III. Título.

“O sucesso não é a chave para a
felicidade. A felicidade é a chave para o
sucesso.”

Albert Schweitzer

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, pela minha existência e por todos os objetivos alcançados.

À minha mãe Márcia Maria, um exemplo de mulher, que sempre me apoiou e me ensinou todos os meus princípios e valores.

Ao meu pai Carlos Alberto, que não está mais presente fisicamente nesta vitória, mas foi fundamental em todas as etapas da minha vida, me incentivando a nunca desistir e sempre seguir em busca dos meus sonhos.

Aos meus irmãos Manuela e Marcos, pelo companheirismo, sempre me ajudando nos momentos que mais preciso. E também aos meus avós, tios e primos que enchem minha vida de alegria, essenciais em todas as etapas da minha vida.

Ao meu namorado Carlos Adriano, que tem sido um verdadeiro companheiro, sempre do meu lado nos momentos bons e ruins durante a graduação.

Ao meu orientador, Professor Dr. Osvaldo Ronald Saavedra Mendez, pela oportunidade de aprendizado, disponibilizando todas as suas experiências para o meu desenvolvimento como engenheira eletrônica.

Ao meu coorientador, Professor Dr. Denisson Queiroz Oliveira, que guiou o desenvolvimento deste trabalho com muita dedicação e comprometimento.

A todos os membros do grupo de pesquisa GSP, em especial ao Pedro Bezerra e ao Sidney Cerqueira que sempre contribuíram com seus aprendizados durante a minha estadia no laboratório.

Em especial, às minhas amigas, Larissa e Camila, pela cumplicidade, parceria e amizade.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMA. E a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho.

RESUMO

Durante as últimas décadas, as mudanças ocorridas na estrutura operacional e organizacional dos sistemas elétricos de potência, acarretou em novos desafios e barreiras a serem vencidos. A diminuição de reservatórios de combustíveis fósseis e a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente nos leva a busca por fontes renováveis de geração de energia. Dessa maneira, as microrredes introduzem novos paradigmas ao sistema elétrico de potência. Com o crescimento exponencial do consumo de eletricidade, o desenvolvimento das microrredes foi impulsionado pela necessidade de suprir os consumidores de forma mais estável e confiável. Dessa maneira, as microrredes introduzem novos paradigmas de operação e controle dos sistemas de distribuição. Esses sistemas podem operar conectados à rede principal ou operar de maneira isolada (ilhamento). Com o aumento da penetração de microrredes em sistemas de baixa tensão, percebe-se a necessidade da criação de conceitos e metodologias de controle para operar diversas microrredes. Este conceito, conhecido como multi-microrredes, consiste em uma estrutura de alto nível formada por vários microssistemas. A capacidade de operação em modo isolado das microrredes pode ser estendida as multi-microrredes, possibilitando dois modos de operação. Dentro desse contexto, este trabalho consiste no estudo, formulação do problema e resolução da operação resiliente de microrredes de forma colaborativa em situações de perda de rede principal. A metodologia proposta baseia-se no gerenciamento dos recursos enérgicos das microrredes através do algoritmo de otimização por enxame de partículas - *Particle Swarm Optimization*, que tem como função objetivo, minimizar o corte de cargas prioritárias. O modelo de gerenciamento de microrredes durante a operação resiliente proposto é implementado em dois casos: sistema de gerenciamento de microrredes e o sistema de gerenciamento de multi-microrredes. As microrredes usadas como teste neste trabalho utilizam dados de geração obtidos da microrrede isolada da Ilha Grande e da microrrede de Ilha dos Lençóis, ambas no Maranhão. As curvas de demandas foram baseadas nas curvas típicas de carga curva do Sistema Interligado Nacional (SIN). Para as simulações, as gerações renováveis têm prioridade porque não são fontes despacháveis. A metodologia proposta para operação resiliente de microrredes de forma colaborativa mostrou-se mais eficiente na minimização do corte de cargas prioritárias, evidenciando o aumento da resiliência do sistema. Os resultados obtidos demonstram a capacidade de minimização do fornecimento de energia para as cargas críticas das microrredes.

Palavras-chave: Microrredes. Operação Resiliente. Geração Distribuída. Multi-Microrredes.

ABSTRACT

During the last decades, changes in the operational and organizational structure of power systems have led to new challenges and barriers to overcome. The decrease of fossil fuel reservoirs and the growing concern with the preservation of the environment leads us to search for renewable sources of energy. In this way, microgrids introduce new paradigms to the electric power system. With the exponential growth of electricity consumption, the development of the microgrid was driven by the need to supply consumers in a more stable and reliable way. In this way, the microgrids introduce new paradigms of operation and control of the distribution systems. These systems can operate connected to the main network or operate in isolation (islanding). With the increase of microgrid penetration in low voltage systems, it is necessary to create control concepts and methodologies to operate several microgrids. This concept, known as multi-microgrids, consists of a high-level structure formed by several microsystems. The ability to operate in isolated mode of the micro grids can be extended to the multi-microgrids, allowing two modes of operation. Within this context, this work consists of the study, formulation of the problem and resolution of the resilient operation of microgrids in a collaborative way in situations of loss of main network. The proposed methodology is based on the management of the energetic resources of microgrids through the particle swarm optimization algorithm - Particle Swarm Optimization, whose objective function is to minimize the cut of priority loads. The microgrid management model during the proposed resilient operation is implemented in two cases: microgrid management system and the multi-microgrid management system. The microgrids used as test in this work use generation data obtained from the isolated micro-region of Island Grande and the microregion of Island Lençóis, both in Maranhão. The demand curves were based on the typical curve curves of the National Integrated System. For simulations, renewable generations have priority because they are non-dispatchable sources. The proposed methodology of resilient operation of microgrids in a collaborative way proved to be more efficient in minimizing the cut of priority loads, evidencing the increase of the system's resilience. The results obtained demonstrate the capacity of minimizing the power supply for the critical loads of the microgrids.

Key words: Microgrids. Resilient Operation. Distributed generation. Multi-Microgrid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Estrutura básica de uma microrrede.....	5
Figura 2.2 - Estrutura de controle centralizado de uma microrrede	6
Figura 2.3 - Fatores a serem considerados na formulação de uma função objetivo.....	9
Figura 2.4 - Estratégias de Operação de uma Microrrede	10
Figura 2.5 - Painéis fotovoltaicos, (a) monocristalinos e (b) policristalinos.....	12
Figura 2.6 - Curva característica de corrente \times tensão de uma célula fotovoltaica.....	13
Figura 2.7 - Influência da variação da irradiância solar na curva característica I-V.....	13
Figura 2.8 - Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva característica I-V.....	14
Figura 2.9 - Atlas Solarimétrico do Brasil.....	15
Figura 2.10 - Atlas Brasileiro de Energia Solar.....	16
Figura 2.11 – Turbinas: (a) de eixo vertical e (b) horizontal.....	18
Figura 2.12 - Curva típica de potência de saída de uma turbina eólica.....	19
Figura 2.13 - Distribuição de probabilidade de ocorrência das velocidades do vento real e estimada.....	20
Figura 2.14 - Potencial Eólico Brasileiro	20
Figura 2.15 - Componentes básicos de uma microturbina	21
Figura 2.15 - Microturbinas.....	22
Figura 2.17 - Grupo Motor Gerador	23
Figura 2.18 - Eficiência de gerador a diesel típico	24
Figura 2.19 - Classificação dos sistemas de armazenamento de energia	26
Figura 2.20 - Elementos de uma bateria de chumbo-ácido	27
Figura 2.21 - Estrutura de um SMES	28
Figura 2.22 - Visão geral de uma Smart Grid	30

Figura 2.23 - Fluxograma de conexões em uma <i>Smart Grid</i>	31
Figura 2.24 - Modos de operação considerando a resiliência	34
Figura 2.25 - Modos de operação considerando a resiliência	34
Figura 2.26 - Arquitetura de Controle e Gerenciamento de um Sistema Multi-Microrredes...	35
Figura 2.27 - Esquema de Controle Hierárquico de um Sistema Multi-Microrredes.....	37
Figura 3.1 - Fluxograma-Algoritmo PSO.....	39
Figura 3.2 - Sistema de Gerenciamento de Microrredes	41
Figura 3.3 - Sistema de Gerenciamento de Multi-Microrredes	42
Figura 3.4 - Gerenciamento energético realizado com o algoritmo PSO no SGM	43
Figura 3.5 - Gerenciamento energético realizado com o algoritmo PSO no SGMM.....	45
Figura 3.6 - Perfil das classes de demanda da microrrede 1	46
Figura 3.7 - Perfil das classes de demanda da microrrede 2.....	46
Figura 3.8 - Potência de saída da geração eólica e fotovoltaica da microrrede 1	47
Figura 3.9 - Potência de saída da geração eólica e fotovoltaica da microrrede 2.....	47
Figura 4.1 - Curvas de Convergência do SGM das Microrredes 1 e 2 respectivamente.....	50
Figura 4.2 - Composição das fontes despacháveis das microrredes 1 (Caso 1)	51
Figura 4.3 - Composição das fontes despacháveis das microrredes 2 (Caso 1)	51
Figura 4.4 - Curvas de Convergência do SGM	54
Figura 4.5 - Composição das fontes despacháveis das microrredes 1 (Caso 2)	55
Figura 4.6 - Composição das fontes despacháveis das microrredes 1 (Caso 2)	55
Figura 4.7 - Resultado comparativo das demandas atendidas para a Microrrede 1	58
Figura 4.8 - Resultado comparativo das demandas atendidas para a Microrrede 2	58
Figura A.1 - Partículas espalhadas no espaço de busca.....	64
Figura A.2 - Processo de atualização da posição do algoritmo	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comparação entre redes convencionais e as redes elétricas inteligentes	31
Tabela 3.1 - Classificação dos níveis de Prioridades.....	40
Tabela 3.2 - Parâmetros do Gerador Diesel e Bateria da Microrrede 1.....	48
Tabela 3.3 - Parâmetros do Gerador Diesel e Bateria da Microrrede 2.....	48
Tabela 3.4 - Parâmetros exportação/importação de energia das microrredes	49
Tabela 4.1 - Resultado obtidos de demanda atendida para a Microrrede 1.....	52
Tabela 4.2 - Resultado obtidos de demanda atendida para a Microrrede 2.....	53
Tabela 4.3 - Resultado obtidos de demanda atendida para a Microrrede 1.....	56
Tabela 4.4 - Resultado obtidos de demanda atendida para a Microrrede 2.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CAMC	<i>Central Autonomous Management Controller</i>
CC	<i>Central Controller</i>
CIGRÉ	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i>
DOE	Departamento de Energia do Estado Unidos
DSO	<i>Distribution System Operator</i>
DMS	<i>Distribution Management System</i>
FV	Fotovoltaico
GD	Geração Distribuída
LC	<i>Load Controllers</i>
MAS	<i>Multiagent Systems</i>
MC	<i>Local Microsource Controllers</i>
MGCC	<i>MicroGrid Central Controller</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
MT	Média Tensão
NWP	<i>Numerical Weather Prediction</i>
PCC	Ponto Comum de Conexão
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
RED	Recursos Energéticos Distribuídos
SGE	Sistema de Gerenciamento de Energia
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Integrado Nacional

SGE	Sistema de Gerenciamento Energético
SGM	Sistema de Gerenciamento de Microrredes
SGMM	Sistema de Gerenciamento de Multi-Microrredes
SMES	<i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i>
STC	<i>Standart Test Condition</i>
SOC	<i>State Of Charge</i>
UC	<i>Unit Commitment</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO	2
1.2	OBJETIVOS	3
1.2.1	Objetivo Geral	3
1.2.2	Objetivos Específicos	3
1.2.3	Estrutura do trabalho	3
2	MICRORREDES	4
2.1	Definição.....	4
2.2	Estrutura Básica das Microrredes	5
2.3	Gerenciamento e Operação de Microrredes.....	7
2.3.1	Módulo de Previsão	7
2.3.2	Módulo de Otimização	8
2.3.3	Módulo de Operação	9
2.4	Recursos Energéticos Distribuídos	11
2.4.1	Energia Solar Fotovoltaica	12
2.4.2	Energia Eólica.....	17
2.4.3	Microturbinas	21
2.4.4	Geradores a Diesel.....	23
2.4.5	Sistema de Armazenamento de Energia	25
2.5	Smart Grid.....	29
2.6	Microrredes Resilientes	32
2.7	Multi-Microrredes.....	35
3	MODELO DE OPERAÇÃO DE MICRORREDES	38
3.1	Otimização por enxame de partículas	38
3.2	Classificação de Prioridade dos Consumidores dentro das Microrredes	40

3.3	Estudo de Casos	41
4	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	50
4.1	Caso 1 – Sistema de gerenciamento das microrredes individualmente	50
4.2	Caso 2 – Sistema de gerenciamento de Multi-Microrredes	54
5	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	60
	ANEXO A – ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS	64

1 INTRODUÇÃO

Durante as últimas décadas, as mudanças ocorridas na estrutura operacional e organizacional dos sistemas elétricos de potência (SEP), acarretou em novos desafios e barreiras a serem vencidos. A diminuição de reservatórios de combustíveis fósseis e a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente nos leva a busca de fontes renováveis de geração de energia. Dessa forma, as microrredes introduzem novos paradigmas ao sistema elétrico de potência.

As microrredes são redes elétricas, que em sua composição básica inclui recursos energéticos distribuídos, dispositivos de armazenamento e cargas flexíveis. Estes sistemas podem operar conectados com a rede principal ou em modo isolado (DE SOUZA RIBEIRO et al., 2011). No qual, o sistemas elétricos passam a ser mais flexíveis, a ponto de serem capazes de atender de forma confiável uma maior quantidade de consumidores; além de torna-los mais robustos, a ponto de atenuar as vulnerabilidades atualmente existentes (LEITE NETO, 2017) .

A ideia de microrredes, e mais precisamente Redes Elétricas Inteligentes (*SmartGrids*), visto que esses sistemas são partes de uma *Smart grid*, nos oferece uma gama de possibilidades de coordenação e controle eficiente para todas essas fontes de geração em pequena escala, mesmo aquelas com natureza intermitente (solar e eólica). As microrredes abrem uma janela de oportunidades para investidores, consumidores e concessionárias de distribuição (BAHRAMIRAD et al., 2015).

O conceito de Redes Inteligentes é bem mais amplo, sendo que sua concepção abrange desde um sistema eficiente de medição e monitoramento da rede até sua autorecuperação diante de *blackouts* (BAHRAMIRAD et al., 2015).

Com o aumento da penetração de microrredes em sistemas de baixa tensão, percebe-se a necessidade da criação de conceitos e metodologias de controle para operar diversas microrredes. Este conceito, conhecido como multi-microrredes, consiste em uma estrutura de alto nível formada por vários microssistemas (HATZIARGYRIOU, 2013).

A capacidade de operação em modo isolado das microrredes pode ser estendida as multi-microrredes, possibilitando dois modos de operação. Em geral, observa-se dois modos operação de uma microrrede: conectada à rede principal e isolada da rede. Dessa forma, caso ocorra uma falta, o sistema irá operar de maneira isolada e a questão é saber quanto tempo as cargas poderão

ser atendidas sem que haja interrupção, ou seja, como gerenciar os recursos energéticos para atender ao máximo possível as cargas do sistema.

No estado normal de operação (conectada à rede), a microrrede realiza o *Unit Commitment* (UC) de maneira tradicional (minimizando custos). Já no modo de operação isolada a microrrede é um sistema independente e especializado, de pequena a média dimensão, considerando ou não, aspectos de resiliência no seu gerenciamento de energia.

A operação de Multi-Microrredes pode trazer diversos benefícios, como por exemplo o gerenciamento mais flexível dos recursos energéticos para todas as microrredes (LOGENTHIRAN *et al.*, 2011). Além disso, outro fator importante é que, com a cooperação energética entre as microrredes tem-se o aumento da resiliência do sistema.

Resiliência representa a capacidade dos sistemas de resistir a incidentes raros e extremos de uma maneira eficiente, assegurando o mínimo de interrupção no fornecimento de energia elétrica, possibilitando uma recuperação rápida e a restauração ao modo de operação normal (KHODAEI, 2014). O conceito de resiliência é bastante utilizado quando se refere à capacidade de manter áreas de sobrevivência e infraestrutura mínima em caso de ocorrências de desastres naturais (OLIVEIRA *et al.*, 2015) A resiliência só é possível para um sistema em que existem diversos Recursos Energéticos Distribuídos (REDs), capazes de fornecer a potência necessária para suprir a carga, ou pelos menos as cargas prioritárias, durante o maior tempo possível ou enquanto durar a contingência.

1.1 MOTIVAÇÃO

As microrredes se apresentam com parte importante do futuro dos sistemas elétrico de potência. Com as necessidades impostas pelo modo de vida das sociedades modernas um dos principais desafios certamente é o de gerar energia de forma mais estável e confiável. Isso traz consigo novos desafios, principalmente no que tange gerenciamento e operação. Neste contexto, há a necessidade da criação de sistemas de gerenciamento que consigam coordenar microrredes para que possam operar de maneira coordenada e resiliente.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 *Objetivo Geral*

Este trabalho tem como objetivo geral contribuir com um estudo, formulação e resolução de um problema de operação de microrredes de forma colaborativa em situações de perda de rede principal.

1.2.2 *Objetivos Específicos*

Os objetivos específicos são os seguintes:

- Desenvolver um modelo de otimização para encontrar a programação ótima diária de microrredes, visando minimizar o corte de carga na operação em modo isolado;
- Investigar modelos de microrredes que operem de forma colaborativa;
- Propor um modelo para operação de microrredes colaborativas, visando minimizar a perda de cargas prioritárias dentro do sistema elétrico.

1.2.3 *Estrutura do trabalho*

O presente trabalho está estruturado em 5 capítulos, incluindo o capítulo introdutório.

No Capítulo 2 é apresentada uma abordagem geral a respeito do tema microrredes: definições, estrutura básica, gerenciamento e operação. Além disso, é apresentado um descritivo dos principais recursos energéticos de uma microrrede e sistemas de armazenamento. Também é feita uma breve contextualização sobre *smart grids*, microrredes resilientes e multi-microrredes.

O Capítulo 3 apresenta a formulação e o modelo proposto para gerenciamento de microrredes durante a operação resiliente, considerando a ocorrência de uma contingência, no qual as microrredes passam a operar em modo isolado.

No Capítulo 4 são apresentados os estudos de caso, e resultados com a aplicação da metodologia proposta.

O Capítulo 5 apresenta as considerações finais do trabalho e as sugestões de trabalhos futuros.

2 MICRORREDES

Neste capítulo apresentam-se a definição, estrutura básica das microrredes e suas estratégias de operação, apresenta-se também um referencial teórico dos principais recursos energéticos distribuídos e sistemas de armazenamento de energia. E por fim, relata-se uma breve contextualização sobre *Smart Grids*, Microrredes Resilientes e Multi-Microrredes.

2.1 Definição

A definição de microrrede é divergente entre órgão e autores, atualmente não existe uma padronização. Na literatura observa-se que apesar de diversos conceitos diferentes, sempre existem muitos pontos em comum entre as diferentes definições. A seguir temos algumas definições mais difundidas segundo os principais órgãos e autores:

- De acordo com a união europeia, as microrredes são definidas como sistemas de energia de pequeno porte com recursos energéticos distribuídos (REDs), carga controláveis e armazenamento de energia, que possuem a capacidade de operar conectadas a rede principal, ou de forma autônoma. A operação coordenada das microfones promove benefícios para a performance do sistema, se gerenciado e coordenado eficientemente. (HATZIARGYRIOU, 2013)
- Para o Departamento de Energia do Estado Unidos (DOE), uma microrrede é um grupo de cargas e recursos energéticos distribuídos (REDs) interconectados, com limites elétricos bem definidos, que atua como uma única entidade controlável em relação à rede. Uma microrrede pode opera conectada e desconectada da rede (TON, 2012).
- Já para o CIGRÉ, as microrredes compreendem sistemas de distribuição de baixa tensão com fontes de energia distribuídas, dispositivos armazenamento e cargas controláveis, que podem ser operados de forma controlada e coordenada. A operação de microrredes oferece vantagens distintas para os clientes e utilidades, ou seja, melhor eficiência energética, minimização do consumo total de energia, redução impacto ambiental, melhoria da confiabilidade do fornecimento, benefícios operacionais da rede, tais como perda redução, alívio de congestionamento, controle de tensão, ou segurança de fornecimento e eletricidade mais eficiente substituição de infraestrutura (CIGRE, 2012).

As definições de microrredes apresentadas acima, possuem diversos fatores em comum como:

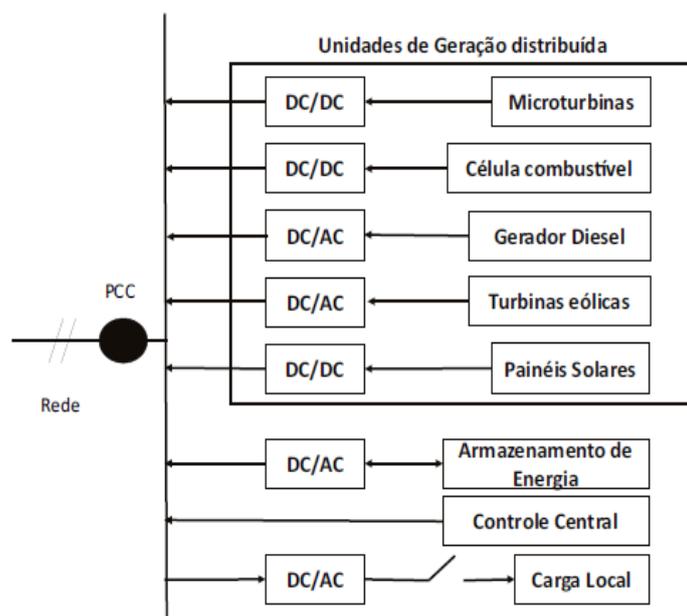
- Sistema elétrico de potência de pequena escala;
- Parte do sistema de distribuição;
- Integram recursos energéticos distribuídos, cargas e armazenamento de energia;
- Podem operar conectadas ou desconectadas à rede principal.

As microrredes introduzem oportunidades únicas na operação do sistema de energia e planejamento, como maior confiabilidade, maior qualidade de energia, redução emissão de carbono, utilização de fontes renováveis de menor custo das fontes de energia, oferecendo eficiência energética, reduzindo o custo de planejamento da expansão do sistema e fornecendo uma resposta eficiente para o fornecimento de cargas em áreas remotas (KHODAEI, 2014).

2.2 Estrutura Básica das Microrredes

A estrutura básica de uma microrrede é apresentada na Figura 2.1. Sendo basicamente composta por unidades de geração, controle central, carga local e armazenamento de energia. As principais fontes de geração para microrredes são as microturbinas, turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos, geradores a diesel e células de combustível.

Figura 2.1 - Estrutura básica de uma microrrede



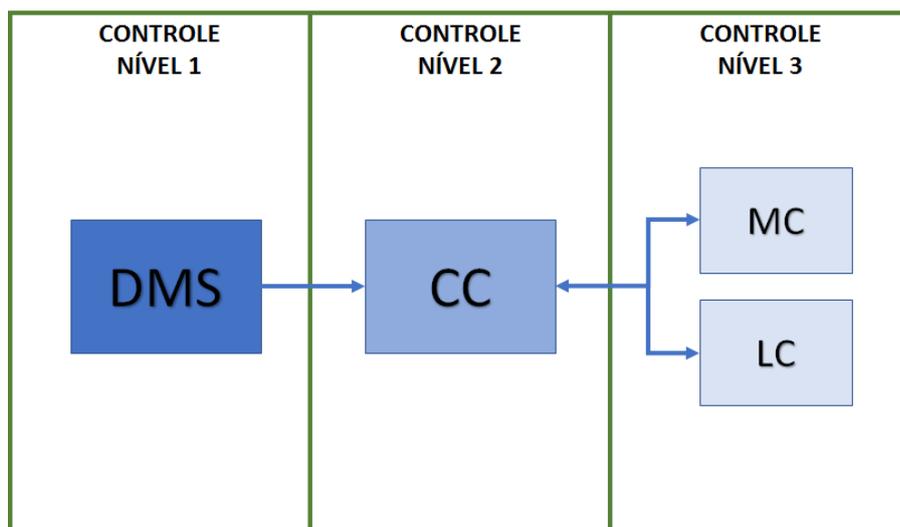
Fonte : Mahmoud et al., 2014.

A microrrede é conectada à rede principal pelo ponto de conexão comum (PCC). O sistema de controle é responsável por realizar a operação da microrrede, sempre buscando manter a estabilidade e segurança da operação. Este controle pode ser baseado em um controle centralizado ou em um controle descentralizado.

O modo de controle centralizado cuja representação mostrada na Figura 2.2 é composta por três níveis:

1. Controladores locais – *Local Microsource Controllers* (MC) e controladores de carga – *Load Controllers* (LC);
2. Controlador central – *Central Controller* (CC);
3. Sistema de gerenciamento e controle da distribuição – *Distribution Management System* (DMS).

Figura 2.2 - Estrutura de controle centralizado de uma microrrede



Fonte: Adaptado de HATZIARGYRIOU, (2013).

Os LC e MC são responsáveis pelo controle de fluxo de potência do perfil de tensão em cada microgeração e também realizam o gerenciamento da demanda e controle dos dispositivos de armazenamento. O CC por sua vez, realiza o controle geral da operação, a proteção e é capaz de estabelecer comunicação com o sistema de gerenciamento do sistema de distribuição (DMS) (DIMEAS; HATZIARGYRIOU, 2005).

No modo descentralizado, o controle baseia-se no uso de sistemas multi-agentes. Nesta proposta de controle descentralizado, a principal responsabilidade é dada aos controladores locais que possuem capacidade de comunicar entre si, cada agente controlador busca uma

melhoria contínua, assim melhorando o desempenho da microrrede (HATZIARGYRIOU, 2006).

2.3 Gerenciamento e Operação de Microrredes

O Sistema de Gerenciamento de Energia (SGE) é uma ferramenta utilizada para controlar, monitorar e realizar a gestão da energia de forma otimizada, com o objetivo de atender a demanda, com confiabilidade, segurança, baixo custo e com preservação do meio ambiente.

A tarefa de gerenciamento de uma microrrede não é uma tarefa fácil, podendo ser tratada como um problema de otimização, pois além de realizar o controle e proteção do sistema, o SGE deve otimizar os recursos de geração distribuída de maneira econômica, com segurança e confiabilidade.

Um SGE tem formulação baseada na arquitetura de controle da microrrede, podendo ser centralizado ou descentralizado (OLIVARES, 2014). O SGE é composto por três módulos: módulo de previsão, módulo de otimização e módulo de operação. Nos próximos tópicos serão descritos tais módulos.

2.3.1 Módulo de Previsão

O módulo de previsão desempenha um papel importante em um SGE, pois através dele se tem as previsões necessárias para realizar o despacho das unidades geradoras, possibilitando a aplicação de estratégia de operação.

Na literatura encontra-se diferentes modelos de previsão, dentre eles alguns baseados regressão, filtros de Kalman, máquinas de vetores, métodos de estado-espço e outros baseados em inteligência artificial, como *Fuzzy*, Algoritmos Genéticos e Redes Neurais Artificiais.

A operação de fontes intermitentes traz grandes desafios quanto a previsão dos recursos. A previsão de energia eólica e solar são classificadas em duas categorias: métodos físicos e estatísticos. Os modelos físicos utilizam de dados físicos e Predições Numérica de Tempo –

Numerical Weather Prediction (NWP). Já os métodos estatísticos, procuram a correlação entre os dados históricos de medição e também o NWP (REN et al., 2015).

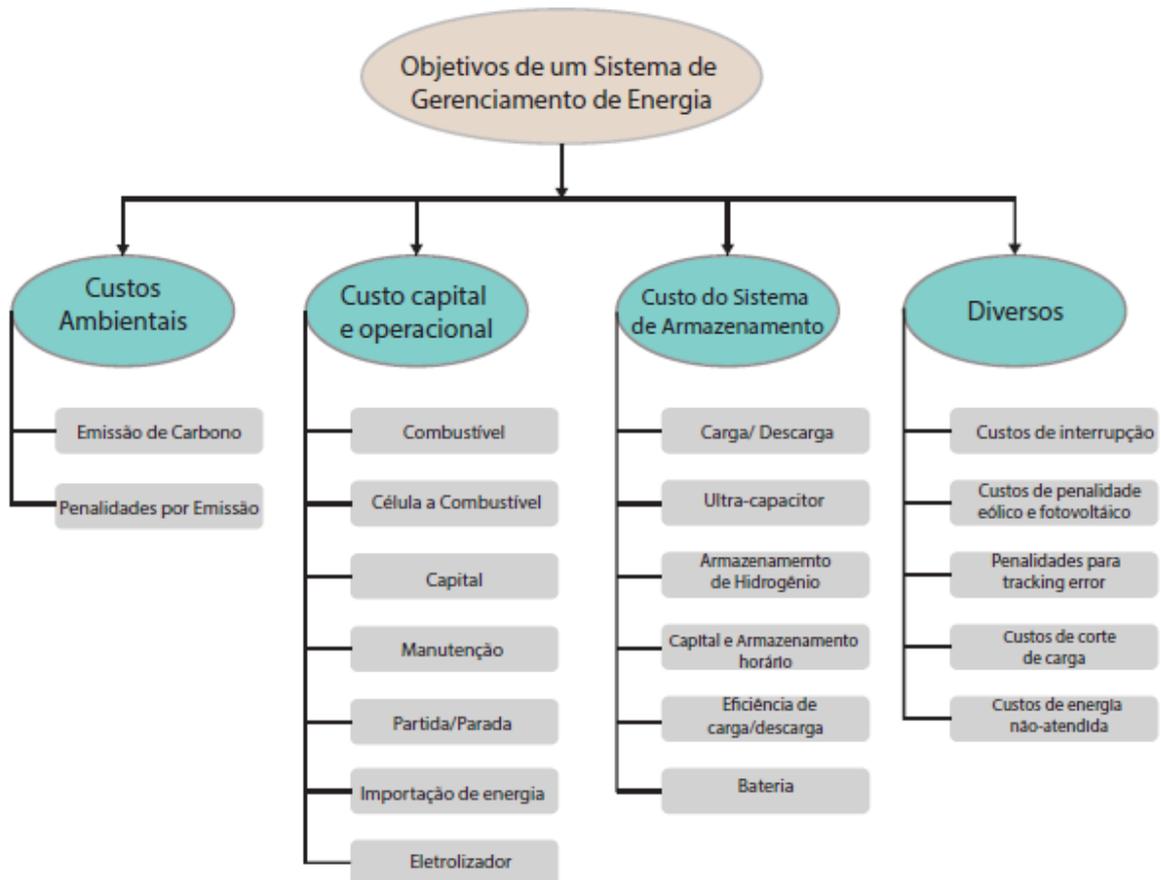
Os métodos estatísticos obtêm ótimos resultados no curto prazo, enquanto que os métodos físicos são melhores em previsões de longo prazo. Na prática, a maioria dos modelos de previsão utilizam uma combinação dos modelos físicos e estatísticos, conhecidos como métodos híbridos.

2.3.2 *Módulo de Otimização*

O módulo de otimização é o principal de um SGE, nele se define como o algoritmo de otimização deve agir perante as informações adquiridas. O modelo do processo de otimização é definido pelo modo de operação da microrrede. No qual, a operação ótima de microrredes visa minimizar o custo total de produção dos geradores diesel, atendendo todas as restrições técnicas, além de suprir totalmente a demanda local.

A determinação da função objetivo pode ter diferentes concepções, dependendo das preferências do operador. Em Khan (2016) encontra-se as principais funções objetivos e algoritmos de otimização aplicados ao gerenciamento de energia em microrredes. Na Figura 2.3 são descritas as características inseridas na função objetivo, que dependerá dos interesses do usuário. Deste modo, pode-se ter funções simples, com objetivo de minimizar o custo do combustível, indo até funções mais complexas incluindo a natureza estocástica das fontes renováveis ou ainda funções multiobjetivo.

Figura 2.3 - Fatores a serem considerados na formulação de uma função objetivo

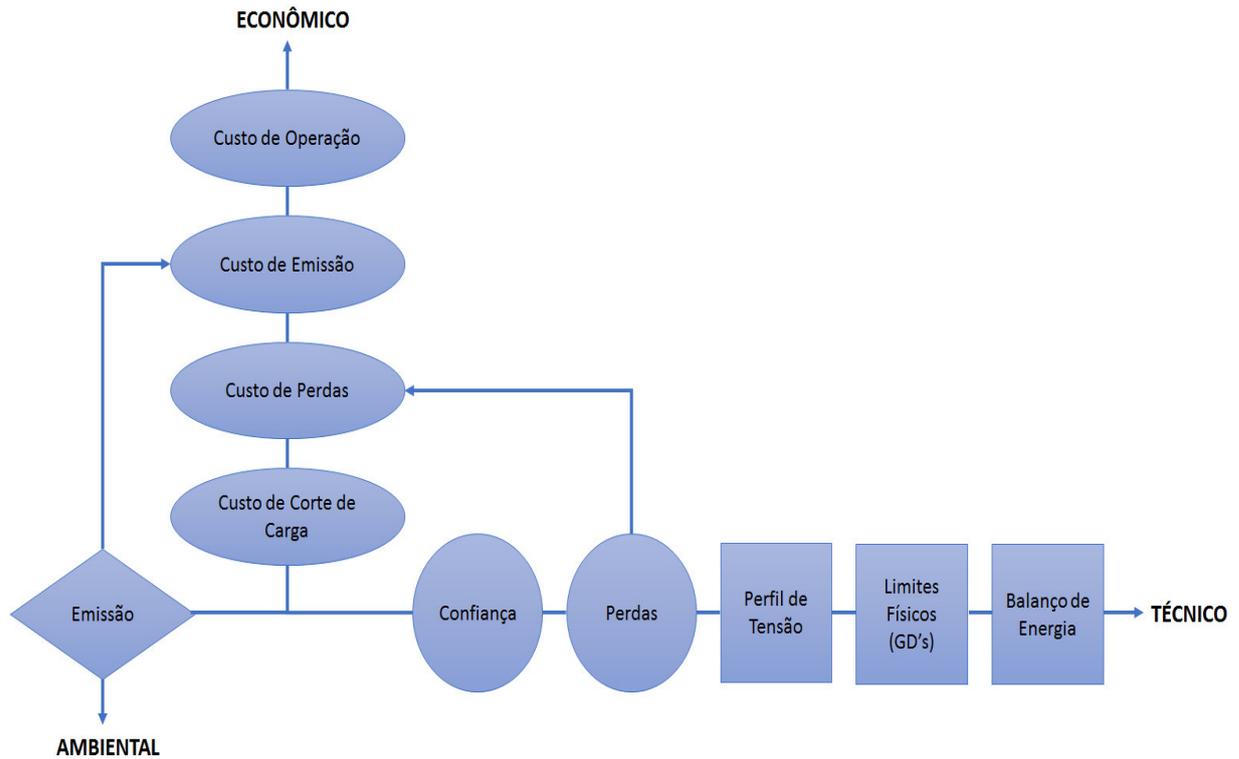


Fonte: KHAN et al., (2016).

2.3.3 Módulo de Operação

As microrredes podem operar de várias maneiras, isto é, depende da estratégia adotada pelo operador. A programação ótima da microrrede pode ser baseada na sua operação de maneira econômica, técnica ou com requisitos ambientais. A Figura 2.4 ilustra as diferentes estratégias de operação.

Figura 2.4 - Estratégias de Operação de uma Microrrede



Fonte: Adaptado de HATZIARGYRIOU, (2013).

Cada estratégia de operação possui diferentes objetivos e que podem ser resumidos como segue:

- Econômico- Neste modo, o objetivo é minimizar o custo total de produção sem focar nas restrições ambientais e técnicas, e obrigações com à rede principal;
- Técnicas- otimiza a operação da microrrede minimizando perdas no sistema, variações de tensões, entre outros aspectos técnicos sem considerar custos de produção e impactos ambientais;
- Ambiental- O despacho das unidades é realizado visando a minimização da emissão de poluentes, não tendo como foco as restrições técnicas e aspectos financeiros.

As microrredes basicamente operação de dois modos:

- Modo conectada à rede principal;
- Modo Isolada.

As Microrredes conectadas a rede principal, se localizam a montante da rede de MT, possuem dois modos de funcionamento: normal e emergência/crítico. No modo normal a microrrede está efetivamente conectada à rede de MT e no modo de operação

emergência/crítico decorrente a defeitos que possam ocorrer na rede de MT, em caso de um colapso parcial ou generalizado. De acordo com as potencialidades futuras das microrredes, o modo normal de operação deve passar pelo funcionamento em rede isolada autossustentável, em que cada microrrede poderá interagir de forma colaborativa com as microrredes vizinhas, assistidas por sistemas de gestão e controle inteligentes.

No modo de operação isolada a microrrede é um sistema independente e especializado, de pequena a média dimensão, que tem como objetivo manter a qualidade e assegurar a confiabilidade energética. Nas microrredes isoladas, a geração de energia com geração distribuída, entre as quais fontes renováveis, assume uma importância crucial para o seu funcionamento sustentável, já que não contempla uma possível conexão com rede elétrica convencional de distribuição.

2.4 Recursos Energéticos Distribuídos

Os recursos energéticos distribuídos (RED) de uma microrrede podem ser classificados em dois grupos: geradores distribuídos (GD) e sistemas de armazenamento (PLANAS et al., 2015).

Os geradores distribuídos incluem vários tipos de fontes de geração de energia, podendo ser fontes renováveis ou não. Nas microrredes as fontes mais utilizadas são a eólica, solar fotovoltaica, microturbinas, células de combustíveis e grupos geradores a diesel (LEITE NETO, 2017).

Fontes de energias renováveis, são fontes de energias dependentes das condições climáticas, sendo necessária a utilização de geradores despacháveis como microturbinas e/ou geradores a diesel, assim como também pode ser necessária a utilização de sistemas de armazenamento de energia.

Os sistemas de armazenamento são utilizados pra garantir a estabilidade, qualidade e confiança do sistema. As tecnologias de armazenamento de energia mais utilizadas em microrredes são as baterias eletroquímicas, volantes de inércia e os supercapacitores (PLANAS et al., 2015)..

Nos tópicos a seguir são detalhados os principais recursos energéticos utilizados nas microrredes.

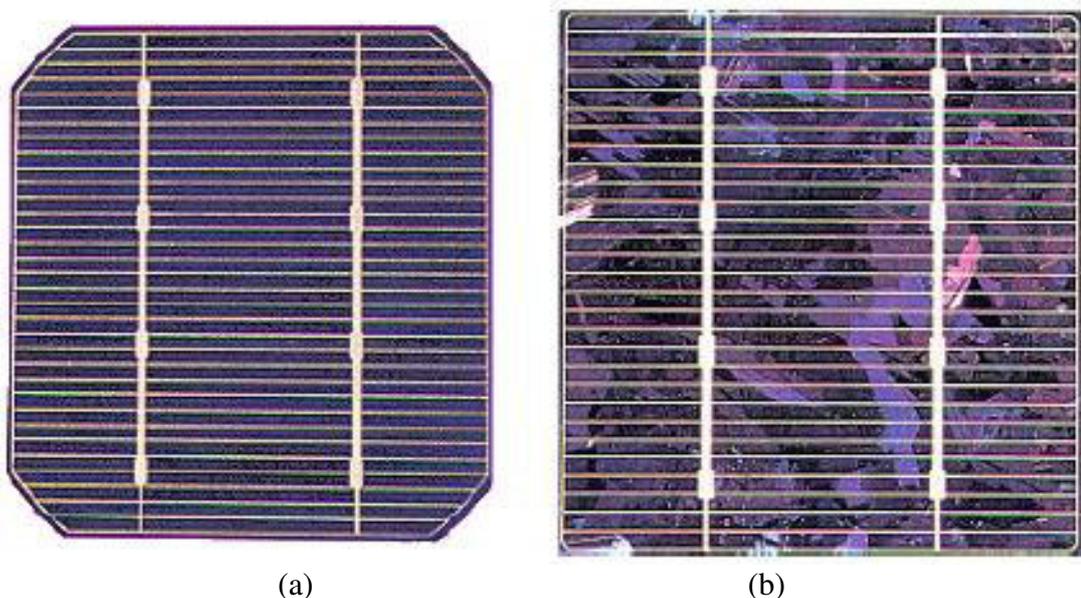
2.4.1 Energia Solar Fotovoltaica

Dispositivos de geração fotovoltaicos – sistemas FV – são sistemas capazes de converter a radiação solar diretamente em energia elétrica, são a maneira mais direta de converter a radiação solar em eletricidade (LEITE NETO, 2017). Dentre as várias tecnologias de aproveitamento de recursos energético renováveis, a geração fotovoltaica é a que possui a maior taxa crescimento na matriz energética global.

Os sistemas FV são compostos pelo conjunto de células agrupadas, que formam um painel fotovoltaico. Estes painéis podem ser agrupados em série e/ou paralelo, de maneira a fornecer um arranjo fotovoltaico, para que seja interligado à uma carga ou a outras fontes de geração, são necessários dispositivos auxiliares como, controladores de carga e inversores (LEITE NETO, 2017).

Os painéis fotovoltaicos possuem em sua composição semicondutores, sendo o silício o semicondutor mais difundido no mercado, ele possui duas séries de produção em larga escala, uma com base em silício monocristalino (m-Si) e outra com silício policristalino (p-Si), como pode ser observado na Figura 2.5. Outras tecnologias são utilizadas em menor escala devido disponibilidade, vida útil, rendimento e toxicidade. Tais como, silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe) (VILLALVA *et al.*, 2016).

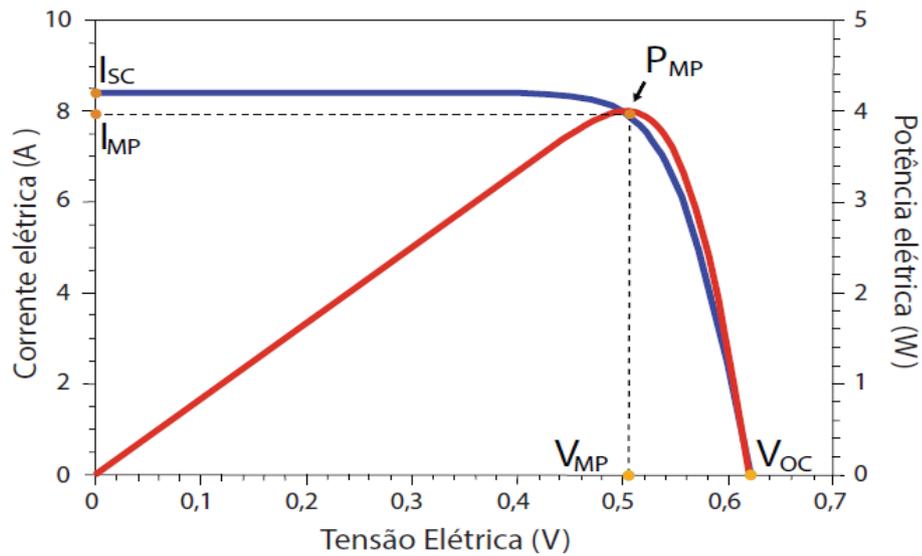
Figura 2.5 - Painéis fotovoltaicos, (a) monocristalinos e (b) policristalinos



Fonte: SCHWEDE, (2010).

A potência elétrica gerada por um painel FV é o produto entre tensão e corrente do painel. As suas características elétricas podem ser vistas em duas curvas, sendo uma a relação entre a potência e a tensão, e a outra a relação entre a tensão e a corrente, como exemplificado na Figura 2.6.

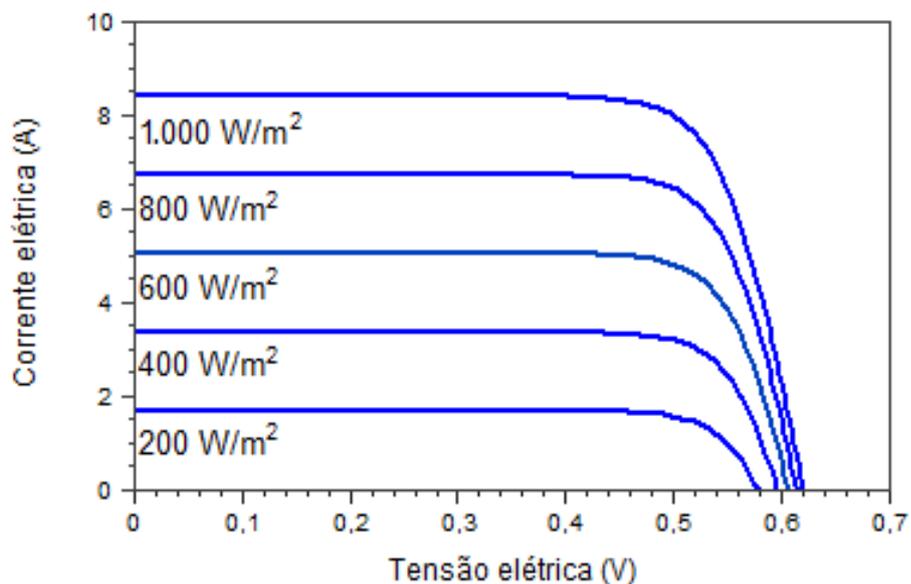
Figura 2.6 - Curva característica de corrente \times tensão de uma célula fotovoltaica



Fonte: Pinho e Galdino, (2014).

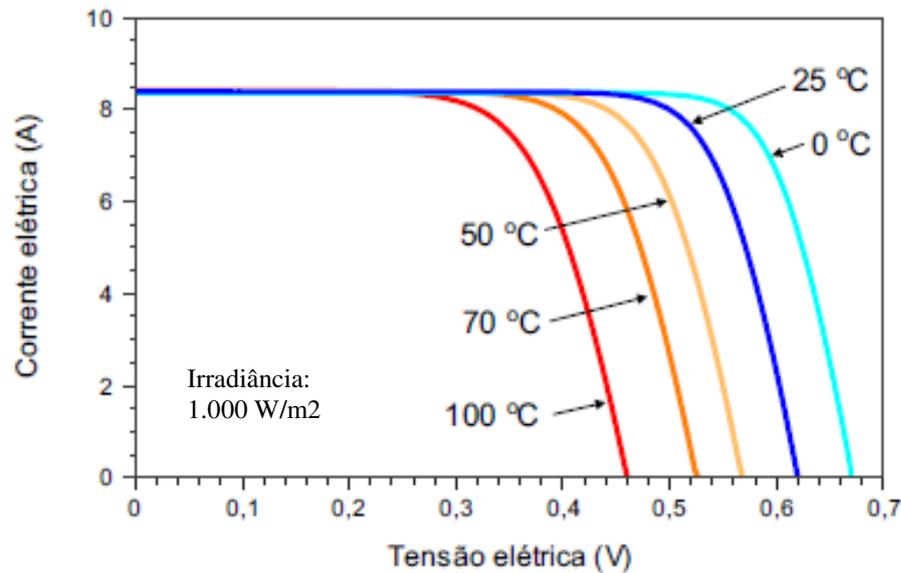
Já a potência gerada pelos painéis FV varia em função da radiação solar e em função da temperatura, como pode ser observado na Figura 2.7 e 2.8.

Figura 2.7 - Influência da variação da irradiância solar na curva característica I-V



Fonte: Pinho e Galdino, (2014).

Figura 2.8 - Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva característica I-V



Fonte: Pinho e Galdino, (2014).

A potência fornecida por um painel fotovoltaico é limitada devido a questões técnicas e fatores de climáticos. Entre os fatores técnicos estão a eficiência, a capacidade nominal instalada, a temperatura nominal de cada célula. Já entre os fatores climáticos tem-se a radiação solar e temperatura ambiente. Considerando todos esses fatores, podemos obter a máxima potência de saída através da expressão (CERQUEIRA *et al.* , 2015):

$$P_V = P_{STC} \frac{G_{ING}}{G_{STC}} [1 + k_{PV} (T_C - T_r)] \quad (2.1)$$

em que G_{ING} é a radiação solar incidente, G_{STC} é a radiação nas condições padrão de teste – *Standart Test Condition* (STC), T_c é a temperatura da célula, T_r é a temperatura de referência e k é o coeficiente de temperatura. P_V é a potência de saída e P_{STC} é o módulo máximo da potência de saída em condições padrões de teste.

A eficiência de conversão de um módulo solar, leva em conta a potência máxima produzida pelo módulo e a radiação solar incidente na área da placa pode ser calculada através da expressão:

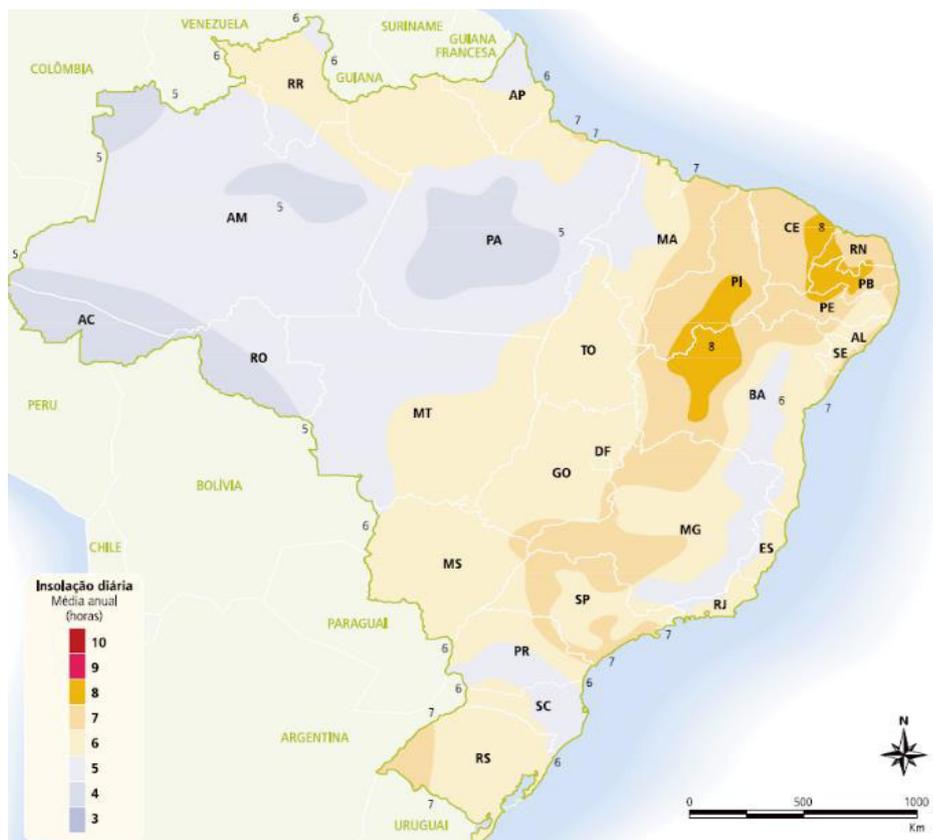
$$\eta = \frac{P_{MP}}{G \cdot A} \quad (2.2)$$

em que P_{MP} é o ponto de máxima potência, G é a irradiância padrão igual a $1000\text{W}/\text{m}^2$ e A é a área do painel solar.

Segundo Souza (2016), os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em sistema isolados (Off-Grid) e sistemas conectados à rede (*On-Grid*). Os sistemas isolados são aqueles que não têm conexão com rede de distribuição principal. Estes sistemas podem ser classificados em híbridos ou autônomos (Puros). Os sistemas híbridos operam em conjunto com outro sistema de geração. Já os sistemas autônomos não possuem outra forma de geração.

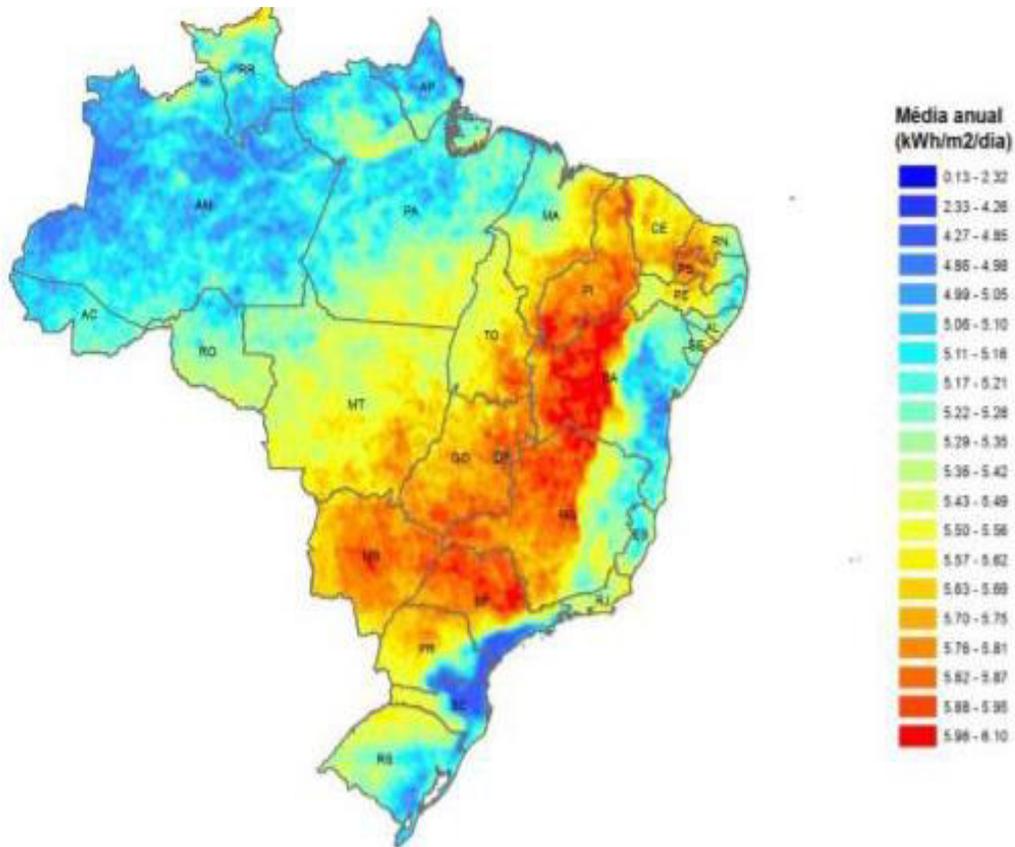
No Brasil temos um ótimo índice de radiação solar, principalmente no norte e nordeste do país. Dois estudos sobre radiação solar no território brasileiro: “Atlas Solarimétrico do Brasil” e o “Atlas Brasileiro de Energia Solar”, mostram as variações na radiação captada na superfície do território brasileiro durante um ano. O Brasil dispõe de relativo potencial de geração com um nível médio de irradiação entre 4 a 6 kWh/m²/dia, conforme as Figuras 2.9 e 2.10.

Figura 2.9 - Atlas Solarimétrico do Brasil



Fonte: ANEEL, (2005).

Figura 2.10 - Altas Brasileiro de Energia Solar



Fonte: PEREIRA, (2006).

Luque e Hegedus (2011) descrevem as principais vantagens e desvantagens da geração de energia solar fotovoltaica. No qual, destacam-se:

Vantagens:

- Fonte de energia vasta;
- Não emitem poluentes, combustão ou radioatividade;
- Baixo custo de operação;
- Sem partes móveis, sem ruídos;
- Temperatura de operação ambiente;
- Painéis com alta confiabilidade;
- Produção anual bastante previsível;
- Pode ser integrado em uma estrutura predial nova ou já existente;
- Pode ser instalado facilmente em qualquer local.

Desvantagens:

- Custo inicial de instalação alto;
- Produção horária ou diária imprevisível;
- Falta de eficiência no armazenamento de energia;
- Fonte primária difusa.

2.4.2 *Energia Eólica*

Energia eólica é uma fonte de energia renovável que vem em crescente desenvolvimento nos últimos anos. Conceitua-se energia eólica como a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (ventos). É uma fonte abundante, obtida através da conversão da energia cinética dos ventos em energia elétrica. O dispositivo de conversão mais utilizado é a turbina eólica.

A energia eólica é utilizada há milhares de anos com a finalidade de bombeamento de água, moagem de grãos dentre outras aplicações que envolvem energia mecânica. As primeiras tentativas para geração de eletricidade surgiram apenas no final do século XIX. No qual a primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica foi instalada em 1976, na Dinamarca.

Existe uma variedade de turbinas eólicas tanto em termo a tecnologia utilizada quanto em termo a capacidade de geração, sendo que as turbinas horizontais com três pás são as mais utilizadas por terem melhor distribuição de peso, menor ruído e são dinamicamente mais estáveis. Já as turbinas de eixo vertical possuem uma eficiência inferior, assim não representam uma parcela significativa no mercado atual.

As turbinas de eixo horizontal, que são montadas em uma estrutura elevada, com pás aerodinâmicas e orientadas na direção do vento, já a de eixo vertical, conseguem gerar energia em qualquer direção do vento, como mostra a Figura 2.11.

Figura 2.11 – Turbinas: (a) de eixo vertical e (b) horizontal



(a)

(b)

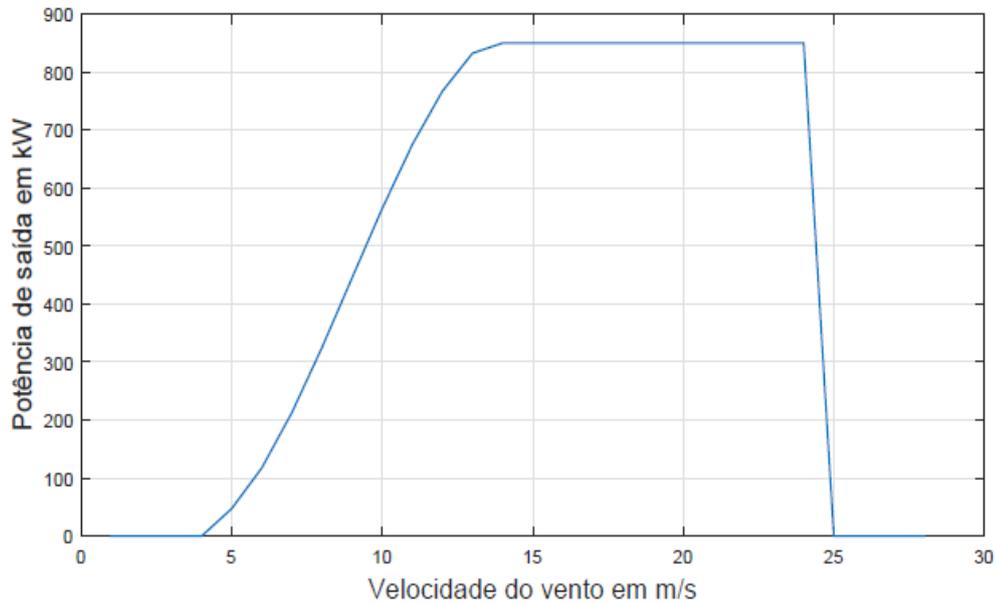
Os sistemas eólicos podem ser utilizados em sistemas isolados, sistemas híbridos ou sistemas interligados à rede elétrica. Os sistemas híbridos apresentam a utilização de mais de uma fonte de geração associadas. Os sistemas interligados à rede, como nos parques eólicos, no qual a geração é entregue diretamente à rede elétrica. Além disso, os geradores de energia eólica podem ser posicionados no mar conhecidos com *offshore* (PICOLO *et al.*, 2014).

A potência elétrica gerada pela turbina eólica é dada por:

$$P_w = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2.3)$$

em que ρ é a densidade do ar, C_p é o coeficiente de potência, A é a área da seção transversal e v é a velocidade do vento. O coeficiente de potência C_p varia conforme velocidade do vento, alcançando o máximo quando está varia entre 12–15m/s, conforme a Figura 2.12.

Figura 2.12 - Curva típica de potência de saída de uma turbina eólica



Fonte: PICOLO *et al.*, (2014).

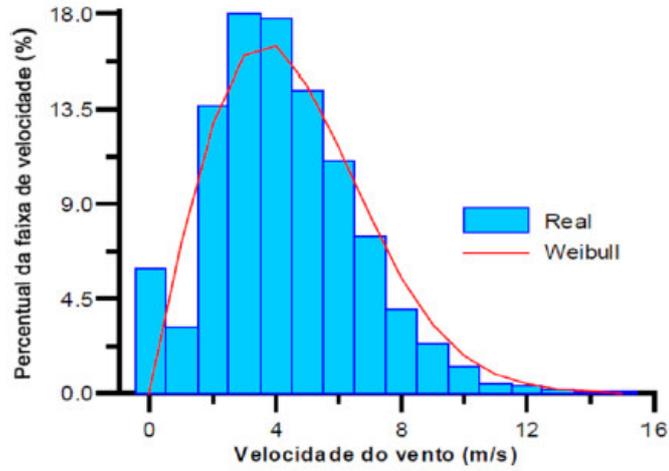
O perfil de velocidades do vento, que pode ser representado pela lei logarítmica de Prandtl (CASTRO, 2003) como:

$$v(z) = \frac{v_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2.4)$$

em que a variação da velocidade v com a altura vertical z , é dada em função da velocidade de fricção (v_*), da constante de Von Karmám (k), e o comprimento de rugosidade z_0 .

A velocidade do vento pode ser representada pela distribuição de probabilidade, a função de probabilidade mais usada para estimar e calcular a potência de saída das turbinas é a distribuição de Weibull, que é bastante utilizada. A Figura 2.13 mostra a comparação entre os valores reais medidos e os valores obtidos com a distribuição analítica para uma determinada localidade. (PICOLO *et al.*, 2014).

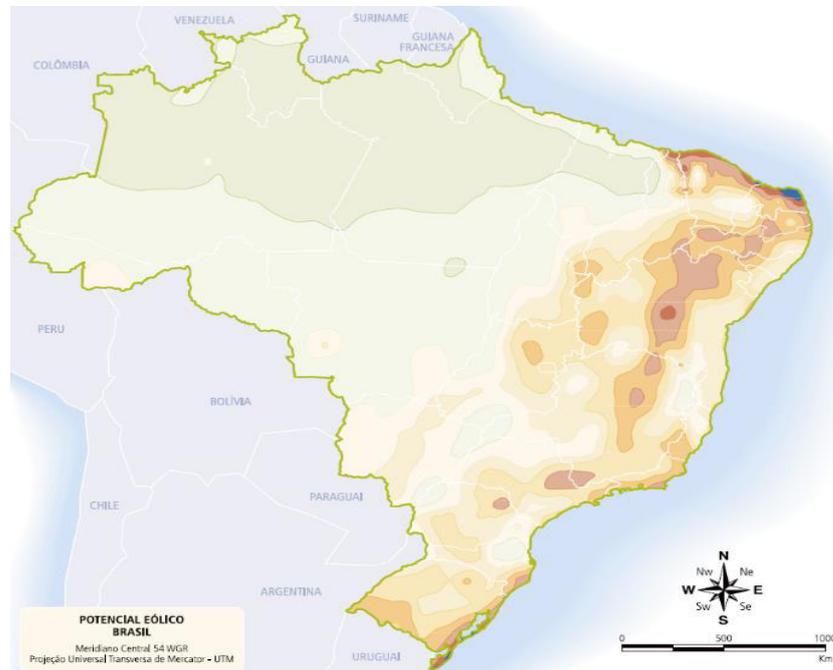
Figura 2.13 - Distribuição de probabilidade de ocorrência das velocidades do vento real e estimada



Fonte: PICOLO *et al.*, (2014).

Segundo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro realizado pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica – CRESESB/CEPEL, estima-se que o potencial eólico brasileiro é da ordem de 143 GW.

Figura 2.14 - Potencial Eólico Brasileiro



Velocidade média do vento (m/s)
50 m acima do nível da superfície

	Mata	Campo Aberto	Zona Costeira	Morro	Montanha
4	> 6,0	> 7,0	> 8,0	> 9,0	> 11,0
3	4,5 - 6,0	6,0 - 7,0	6,0 - 7,0	7,5 - 9,0	8,5 - 11,0
2	3,0 - 4,5	4,5 - 6,0	4,5 - 6,0	6,0 - 7,5	7,0 - 8,5
1	< 3,0	< 4,5	< 4,5	< 6,0	< 7,0

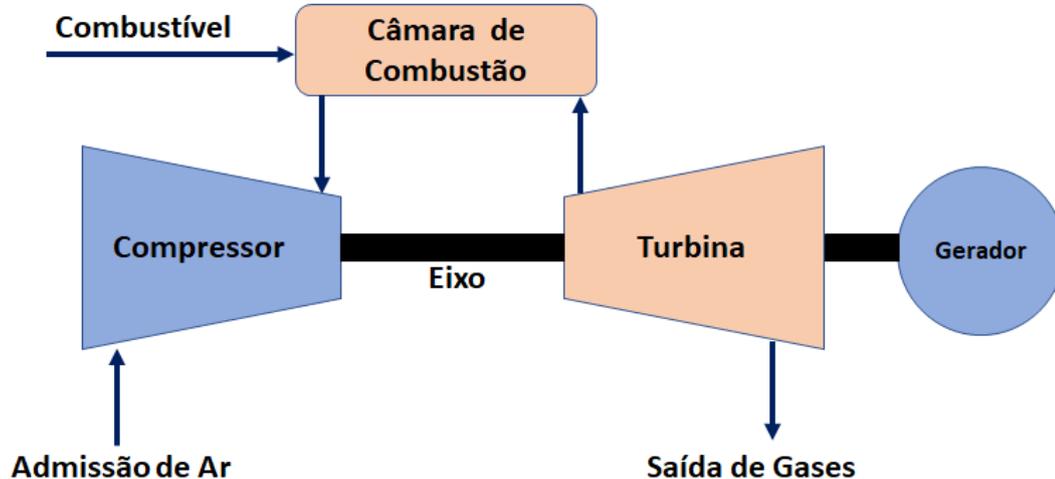
Fonte: CRESESB, (2008).

A energia eólica é uma fonte primária abundante, de fácil implementação e sem emissão gases do efeito estufa. Entretanto, apesar do seu elevado crescimento no mundo, os custos de instalação ainda são altos. Porém, com a disseminação deste tipo de empreendimento o *payback* é cada vez menor. Outro problema associado é a natureza intermitente do vento, que pode ocasionar problemas de estabilidade em sistemas de potência.

2.4.3 Microturbinas

As microturbinas são pequenos geradores, com capacidade entre 25 kW e 500 kW. Uma microturbina é construída das seguintes partes principais um compressor, uma câmara de combustão, um gerador e uma turbina. Seu funcionamento é semelhante ao das turbinas a gás. Os combustíveis empregados em microturbinas são o gás natural, biogás, biodiesel, diesel e o querosene, ilustrado conforme a Figura 2.15 (ALIMARDANI *et al.*, 2011).

Figura 2.15 - Componentes básicos de uma microturbina



Fonte: Adaptado de COSTA, (2010).

As microturbinas se apresentam como uma das mais promissoras tecnologias de GD, pois elas oferecem vantagens em comparação com outras tecnologias, incluindo vida útil longa (cerca de 45.000 h), dimensões peso reduzidos, resposta rápida, alta eficiência, menores emissões, menores custos de eletricidade e grande flexibilidade. Além disso, as microturbinas oferecem uma solução limpa e eficiente, sendo adequadas para pequenos edifícios comerciais

tais como: pequenos escritórios, restaurantes, lojas de varejo, hotéis / motéis, hospitais e pequenas indústrias (ISMAIL *et al.*, 2013).

Figura 2.16 - Microturbinas



As microturbinas operam no ciclo termodinâmico de calor, conhecido como *Ciclo de Brayton*. No qual o ar comprimido é enviado para a câmara de combustão a uma pressão constante e é misturado com o combustível, realizando a queima da mistura. Com isso tem-se no produto final um vapor com alta temperatura e pressão, o mesmo é utilizado para movimentar as pás da turbina e gerar energia mecânica no eixo. A energia mecânica gerada é utilizada para acionar o compressor e a energia remanescente é utilizada para acionar o gerador ou outra carga.

A eficiência de uma microturbina pode ser calculada através de (ASHABANI; MOHAMED, 2013) :

$$\eta_{MT} = \frac{P_{el} + P_{T,rec}}{m_f \cdot LHV_f} \quad (2.5)$$

em que P_{el} é a potência elétrica, $P_{T,rec}$ é a potência térmica (kW), m_f é o fluxo de massa do combustível kg /s e LHV_f é a taxa de calor (kJ/kg f).

Em (Andreos, 2013) descreve-se as principais vantagens e desvantagens do uso de microturbinas.

Vantagens:

- A baixa emissão de poluentes;
- Tempo de instalação baixo;
- Pequenas dimensões;
- Baixo peso;
- Utilização de múltiplos combustíveis;
- Menor número de partes móveis;

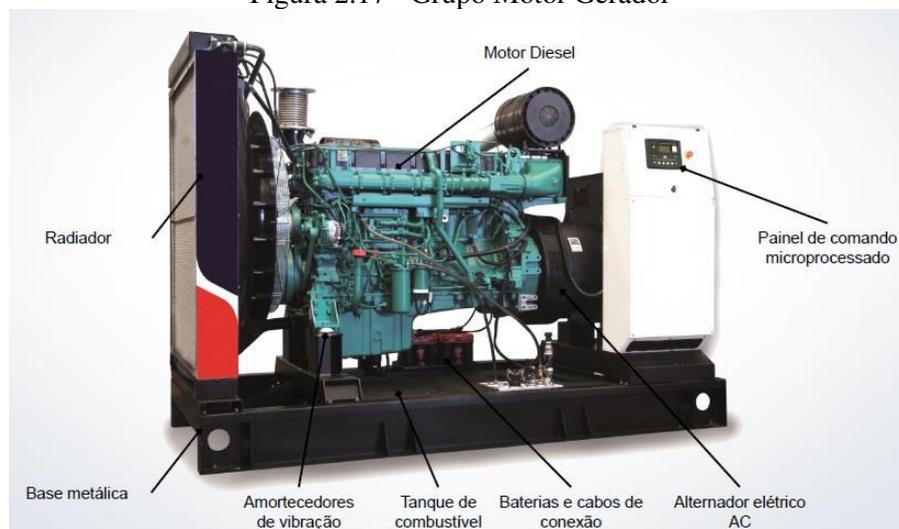
Desvantagens:

- Alto custo inicial
- Rendimento mecânico baixo
- Limitação dos sistemas de cogeração de baixa temperatura.

2.4.4 Geradores a Diesel

Os geradores a diesel são máquina capazes de transformar energia mecânica, gerada por um motor a diesel, em energia elétrica, através de um alternador. Os geradores possuem também componente de supervisão e controle necessários ao seu funcionamento autônomo e destinado ao suprimento de energia elétrica produzida a partir do consumo de óleo diesel (PEREIRA, Jose Claudio, 2006). Na Figura 2.17 pode-se observar os diversos componentes de um grupo motor gerador a diesel.

Figura 2.17 - Grupo Motor Gerador



Fonte: STEMAC, (2011).

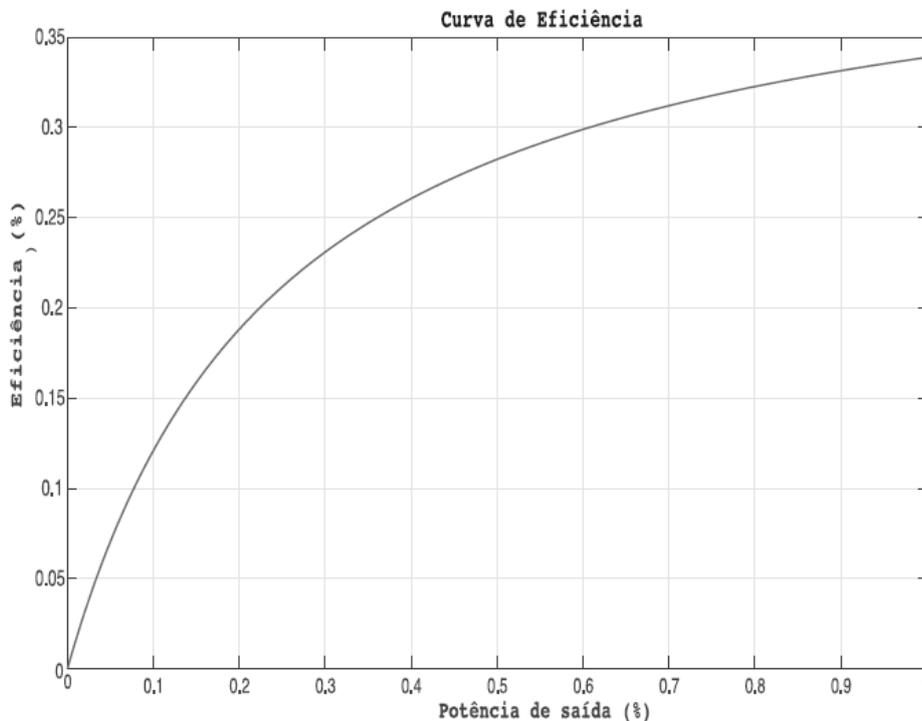
Os geradores a diesel são utilizados nas microrredes com a finalidade de garantir o atendimento contínuo à demanda, principalmente quando a microrrede é isolada da rede principal.

A determinação da capacidade do gerador instalado em uma microrrede leva em consideração os seguintes aspectos (LEITE NETO, 2017):

- Para geradores à diesel conectados diretamente à carga, a sua capacidade nominal deve ser no mínimo igual à máxima demanda;
- Para geradores à diesel que também são utilizados para recarregar baterias, a sua capacidade deve ser capaz de, além de atender a demanda, conseguir injetar corrente nas baterias conforme a recomendações dos fabricantes.

O gerador a diesel é modelado como fonte despachável operando em modo *droop* (LEITE NETO, 2017). O custo associado a esta fonte corresponde ao consumo de combustível, que depende da curva de eficiência da máquina, mostrada na Figura 2.18.

Figura 2.18 - Eficiência de gerador a diesel típico



Fonte: LEITE NETO, (2017).

2.4.5 Sistema de Armazenamento de Energia

Quando se pensa em energias renováveis como eólica e solar, que são fontes de energias dependentes das condições climáticas, se faz necessária a utilização de um sistema de armazenamento de energia. As tecnologias de armazenamento de energia são fundamentais para permitir a expansão dos centros produtores de energia de origem renovável.

Uma rede inteligente deve ter capacidade para operar de forma isoladas em caso de perda de fornecimento e retornar à rede quando este seja restabelecido. O armazenamento de energia em larga-escala que funciona acumulando esta quando há excedente na produção, para ser utilizada quando a demanda for maior que a produção, minimizando as interrupções.

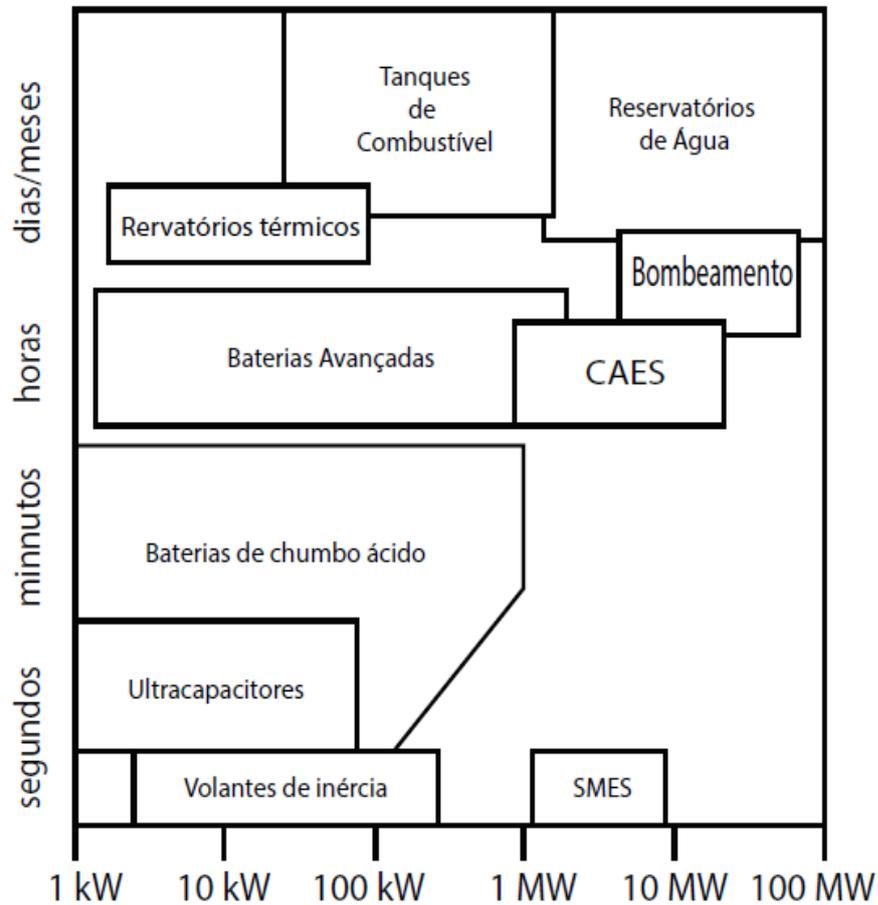
Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE) podem ser definidos como qualquer processo de conversão de energia elétrica em qualquer outra forma de energia, que possa ser armazenada, para posteriormente ser convertida em energia elétrica quando necessário (IBRAHIM; ILINC, 2013).

Segundo Li e Xiu (2012), as tecnologias de sistemas de armazenamento de energia são classificadas em três classes:

- Armazenamento de energia mecânica: Hidrelétrica com bombeamento, Volantes de inércia e Ar comprimido;
- Armazenamento de energia elétrica: Supercapacitores e Sistemas de Armazenamento por Supercondutores Magnéticos;
- Armazenamento de energia química: Baterias de chumbo ácido, Lítio-íon, Níquel-Cádmio, Redox de Vanádio, células combustíveis e demais tipos de baterias.

Na Figura 2.19, tem-se os principais dispositivos de armazenamento de energia com suas respectivas capacidades e tempo de resposta.

Figura 2.19 - Classificação dos sistemas de armazenamento de energia



Fonte: FARRET; SIMÕES, (2006).

Embora existam diversas tecnologias usadas para o armazenamento de energia, as mais comuns para aplicações em microrredes são os volantes de inércia, baterias eletroquímicas, SMES e supercapacitores (HATZIARGYRIOU, 2013).

Os Volantes de Inércia (*Flywheels*) armazenam energia na forma de energia cinética. A energia é armazenada mecanicamente e depois convertida em energia elétrica por um conjunto motor/gerador conectado ao volante de inércia.

As vantagens no uso de volantes de inércia são:

- A alta densidade de potência;
- Tempo de vida útil alto e independente do ciclo de carga/descarga;
- Fácil medição do estado de carga;
- Curto tempo de carregamento;
- Não há necessidade de manutenção periódica;

- Fácil instalação;
- Alta profundidade de descarga e;
- Baixo impacto ambiental.

Já as principais desvantagens são:

- A baixa resistência a choques mecânicos exteriores;
- Velocidade de descarga ser alta.

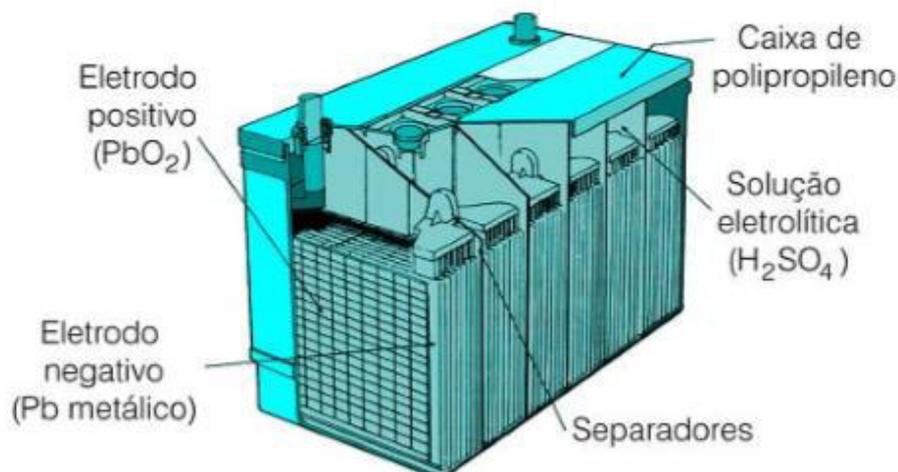
Dentre as várias tecnologias disponíveis e emergentes para baterias, ainda prevalece competitivamente as que usam chumbo ácido, adaptadas para descarga profunda. As razões principais são o custo, desempenho previsível e confiabilidade (LIDEN; REDDY, 2004).

As baterias são dispositivos eletroquímicos que convertem energia química em elétrica e vice-versa. Basicamente, as baterias são um agrupamento de células eletroquímicas, que se associadas em série ou paralelo, determinam uma tensão de saída desejada.

As baterias de chumbo-ácido são compostas basicamente as dos seguintes elementos:

- Eletrodo Positivo: formado por grades revestidas com pasta de dióxido de chumbo;
- Eletrodo Negativo: formado por grades revestidas com pasta de chumbo puro esponjoso;
- Separadores: material isolante que separa os eletrodos positivos dos eletrodos negativos;
- Solução eletrolítica: solução de ácido sulfúrico que permite a reação química entre os eletrodos;
- Caixa de polipropileno: acomoda os eletrodos e a solução eletrolítica;
- Polos: feito de chumbo fundido ou forjado, eles fazem o contato final entre a bateria e a carga a ser alimentada.

Figura 2.20 - Elementos de uma bateria de chumbo-ácido



Fonte: BOCCHI, (2000).

As principais vantagens dos sistemas de armazenamento baseados em baterias são:

- Baixo custo;
- Fácil implementação;
- Eficiência acima de 85%;

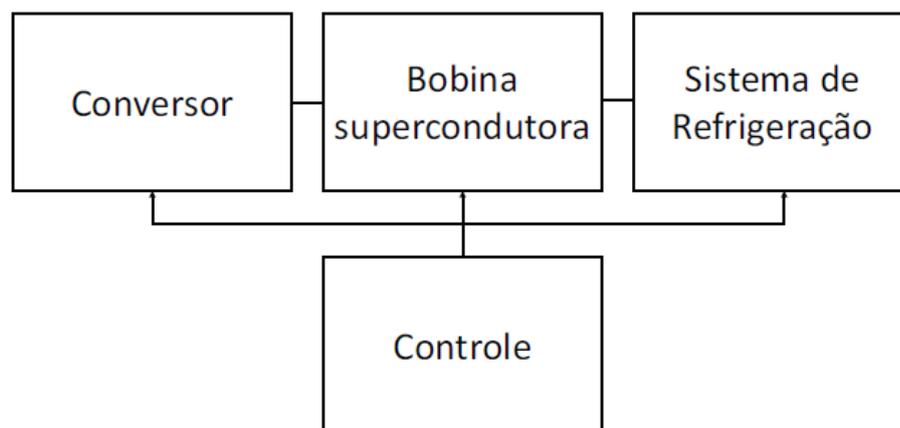
Dentre as desvantagens, pode-se citar:

- Baixa vida útil;
- Contém materiais nocivos;
- Alta corrente de curto-circuito devido à baixa impedância;
- Operam em faixa restrita de temperatura.

Sistemas de Armazenamento por Supercondutores Magnéticos – *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES) são dispositivos que armazenam energia em um campo magnético criado por um fluxo de corrente contínua em uma bobina supercondutora submetida a temperaturas criogênicas (RAO, 2008).

O SMES é composto por quatro partes, sendo uma bobina supercondutora, um conversor de potência, um controlador e um sistema de refrigeração. Na Figura 2.21 mostra-se um sistema de um SMES (FERRAZ et al., 2012).

Figura 2.21 - Estrutura de um SMES



Fonte: FERRAZ et al., (2012).

As principais vantagens do uso de SMES são (RIBEIRO et al., 2001):

- Eficiência acima de 95% para os ciclos de carga/descarga
- Descarga profunda;
- Elevado fluxo de potência e sem perdas nas bobinas.

No que se refere as desvantagens:

- Alto custo de produção;
- Necessidade de um sistema de refrigeração.

2.5 Smart Grid

O conceito de Redes Inteligentes – *Smart Grids* é bem amplo, abrangendo desde um sistema eficiente de medição e monitoramento da rede até sua autorrecuperação diante de um *blackout*.

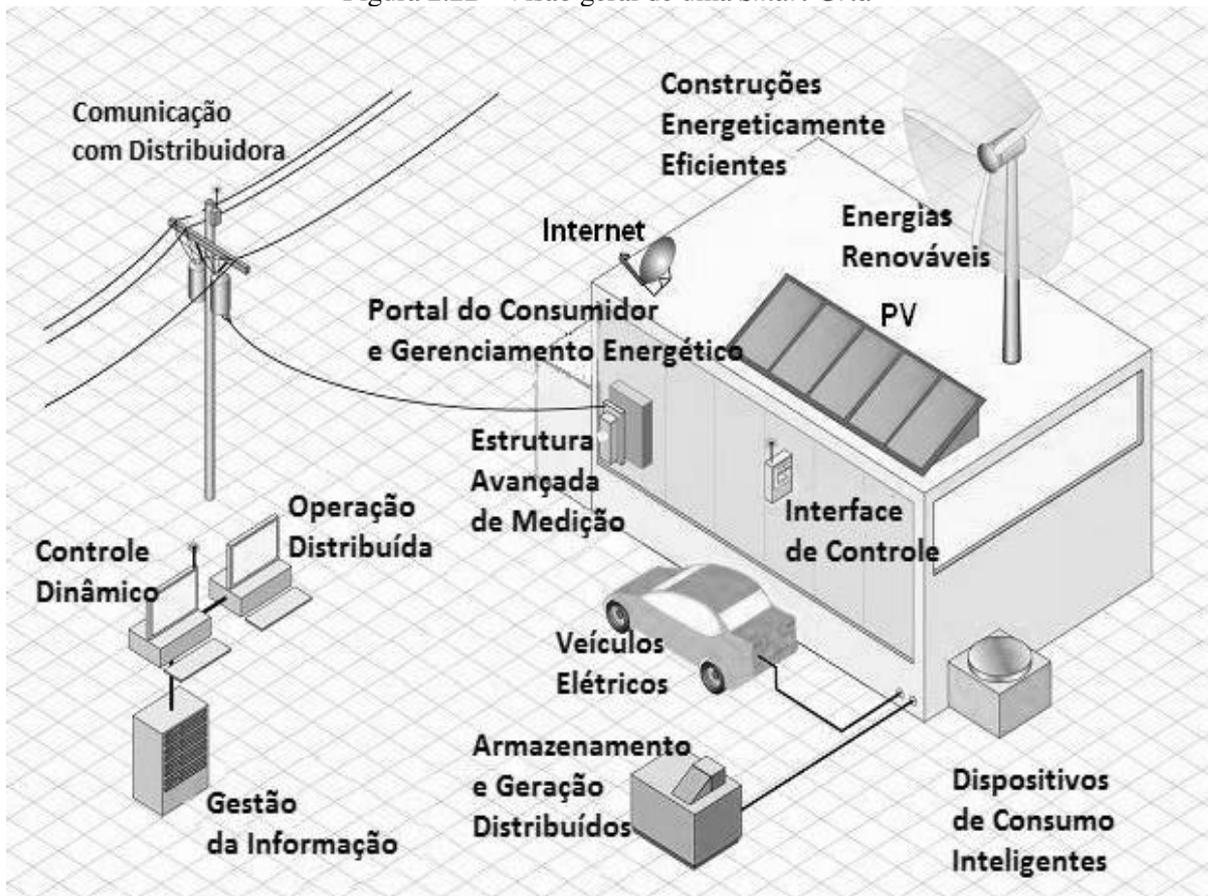
O Instituto Americano de Tecnologia e Padrões – *National Institute of Standards and Technology* (NIST), define *Smart Grid* como “uma rede moderna que permite o fluxo bidirecional de energia, usando comunicação nos dois sentidos e técnicas de controle, que possibilitará novas funcionalidades e novas aplicações” (NIST, 2012).

As Redes Elétricas Inteligentes reúnem vários conceitos novos, tecnologias e automação dos equipamentos que permitirá a interação e tomada de decisão em tempo real dos diversos dispositivos interconectados, melhorando a confiabilidade do sistema e melhor utilização dos recursos energéticos. Assim as *Smart Grids*, são uma nova arquitetura de distribuição de energia elétrica, mais segura e inteligente, que integra e possibilita ações a todos os usuários a ela conectados.

Nesse contexto, o fluxo de energia elétrica e o de informações se dá de forma bidirecional. Com isso, a energia elétrica poderá ser gerada e integrada às redes elétricas a partir de unidades consumidoras. Cria-se, então, a figura do prosumidor, aquele que é produtor e consumidor, que produz e que fornece energia à rede.

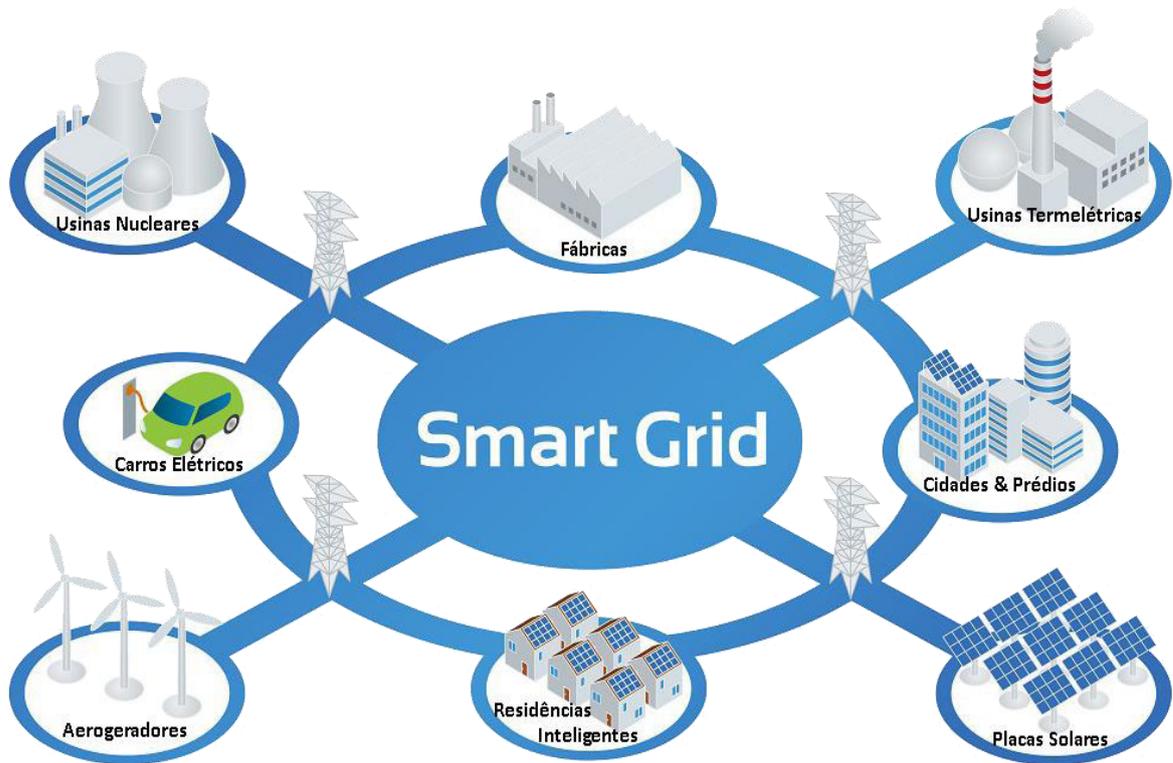
Nas *Smart Grids*, a geração distribuída é uma das principais partes do sistema de energia. Além disso, as GDs melhoram a estabilidade e a confiabilidade da rede inteligente, fornecendo energia de forma econômica. Elas possuem vários benefícios para os clientes, serviços públicos e também para o meio ambiente. (ALIMARDANI et al., 2011).

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), o processo de tornar o sistema elétrico mais inteligente é uma evolução e não um evento pontual.

Figura 2.22 - Visão geral de uma *Smart Grid*

Fonte: MARYAMA, (2013).

As *Smart Grids* devem ser interpretadas mais como um conceito do que uma tecnologia específica. É uma rede elétrica que usa tecnologia de informação, sensoriamento e automação de modo a fornecer energia elétrica de forma eficiente, confiável e segura (RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013). Dessa forma, ela contribui para uma convergência de tecnologias, além de conseguir atender cenários com fontes de energia distribuídas e intermitentes, facilitando a integração de fontes renováveis na rede, como ilustra a Figura 2.23.

Figura 2.23 - Fluxograma de conexões em uma *Smart Grid*

Fonte: PELIELO, (2016).

Na Tabela 2.1 é apresentada a comparação entre as características das redes elétricas convencionais e das redes elétricas inteligentes.

Tabela 2.1 - Comparação entre redes convencionais e as redes elétricas inteligentes

Redes Convencionais	Smart Grids
Comunicação unidirecional	Comunicação Bidirecional
Produção centralizada	Produção distribuída
Poucos Sensores	Inúmeros Sensores
Controle Hierárquico	Controle Distribuído
Monitorização manual	Auto-monitorização
Reparação manual	Auto-reparação
Falhas e apagões	Adaptável, e com operação em modo isolado
Controle limitado	Controle generalizado
Pouca escolha para o consumidor	Diversas opções para o consumidor
Eletromecânica	Eletromecânica e Digital

2.6 Microrredes Resilientes

Na literatura podemos encontrar algumas definições para resiliência (KHODAEI, 2014):

- Resiliência é a capacidade de um sistema de mudar e adaptar-se continuamente, permanecendo dentro dos limites críticos;
- É capaz de se recuperar para um único equilíbrio;
- É a medida de robustez ou capacidade de *buffer* antes que uma perturbação force um sistema de um equilíbrio estável para outro;
- É capaz de se adaptar em reação a uma perturbação;
- É uma capacidade subjacente de um sistema para manter os serviços desejados em face de um ambiente flutuante;
- É capaz de antecipar o risco, limitar o impacto e se recuperar rapidamente através da sobrevivência, adaptabilidade, evolução e crescimento diante de mudanças turbulentas.

Outra definição de resiliência é encontrada em (MARNAY et al., 2015): “Resiliência significa a capacidade de se preparar para se adaptar às condições de mudança e para resistir e se recuperar rapidamente da ruptura. A resiliência da rede depende de muitos fatores, mas um elemento fundamental é poder prever o que vai acontecer com antecedência”.

As Microrredes estão desempenhando um papel cada vez mais popular nas discussões relacionados à confiabilidade da rede elétrica.

Quando se pensa em uma microrrede como parte de um sistema em si (quando se considera uma microrrede em uma localização urbana), então uma microrrede não só poderia desempenhar um papel ambiental, mas também poderia ajudar a otimizar o desempenho da própria cidade. Também pode ser localizado especificamente em uma área onde a pobreza energética é alta, por exemplo, para ajudar a fornecer geração no local quando comparado à eletricidade térmica tradicional (KELLY et al., 2017).

Embora as microrredes tenham sido predominantemente relacionadas com a segurança energética, estes novos tipos de infraestruturas de energia podem ser projetados e construídos para fornecer o melhor rendimento durante eventos de desastres/interrupções. As microrredes atualmente dependem de métricas tradicionais de engenharia para identificar finalidade que elas servem. No entanto, muitos dos códigos e padrões usados para garantir a segurança e confiabilidade das instalações e suas interconexões não consideram os desastres naturais, nem

consideram o aumento das ameaças terroristas e outros imprevistos, deixando a infraestrutura física com vulnerabilidades (KELLY et al., 2017).

Microrredes inteligentes devem ter a capacidade de isolar essas situações e assegurar a entrega de energia elétrica aos consumidores, de forma rápida e eficiente. Além das situações decorrentes de desastres naturais ou acidentes, devem ser capazes de assegurar a entrega de energia, mesmo nas situações de ataques terroristas (ataques físicos ou cibernéticos). Nesse caso, as microrredes devem ter capacidade para o rápido restabelecimento no fornecimento de energia.

A capacidade de ilhamento de microrredes se apresenta como uma solução para resolver problemas de resiliência do sistema de energia e tem atraído muita atenção nos últimos anos. A melhoria da resiliência é alcançada pelas microrredes através da promoção da dispersão de recursos energéticos (KHODAEI, 2014).

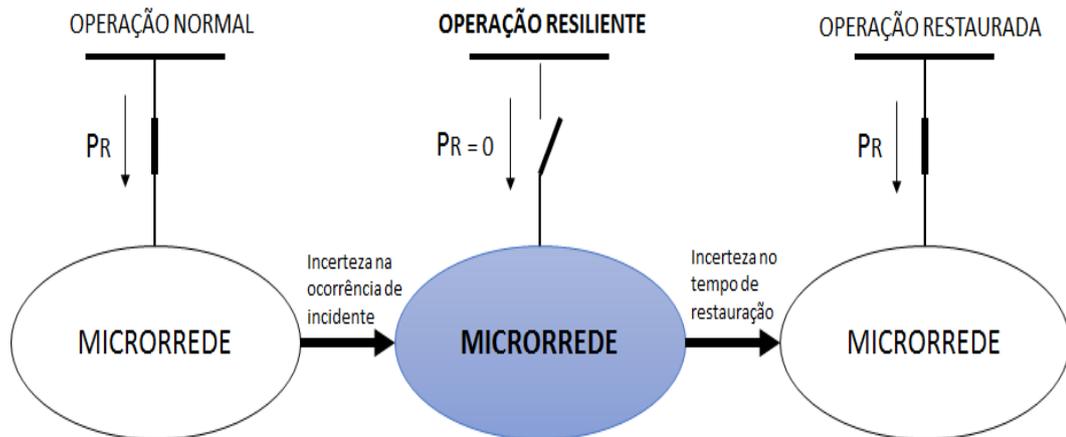
Os benefícios da resiliência de microrredes são amplamente discutidos na literatura. Em (TSIKALAKIS; HATZIARGYRIOU, 2011), são consideradas restrições de adequação para garantir margem operacional suficiente na operação econômica da microrrede e atender as cargas críticas em caso de falhas de rede a montante. É proposto o conceito de sistemas distribuídos de energia autônomos inteligentes em (RAHMAN, 2008), para a construção de um ambiente resiliente, no qual o gerenciamento do lado da demanda é empregado para garantir que cargas críticas sejam atendidas durante condições de emergência.

Uma abordagem de planejamento para construir microrredes resilientes, implementando geradores distribuídos em um sistema de distribuição, é proposto em (XU et al., 2014), que visa otimizar a vulnerabilidade das microrredes, confiabilidade e economia. O modelo de otimização é resolvido por uma combinação de sistemas multiagentes e otimização de enxame de partículas.

Um estudo em (RESENDE; LOPES, 2011) adotada uma sequência de ações de controle para a multi-microrredes no modo ilhado, para a restauração do sistema e a operação subsequente. Mostra-se que a viabilidade da sequência de ações de controle permite a redução dos tempos de restauração de carga e melhora a resiliência do sistema.

Em geral, temos dois modos operação de uma microrrede: estado normal de operação (conectada à rede principal), e no modo isolada da rede principal, conforme a Figura 2.24.

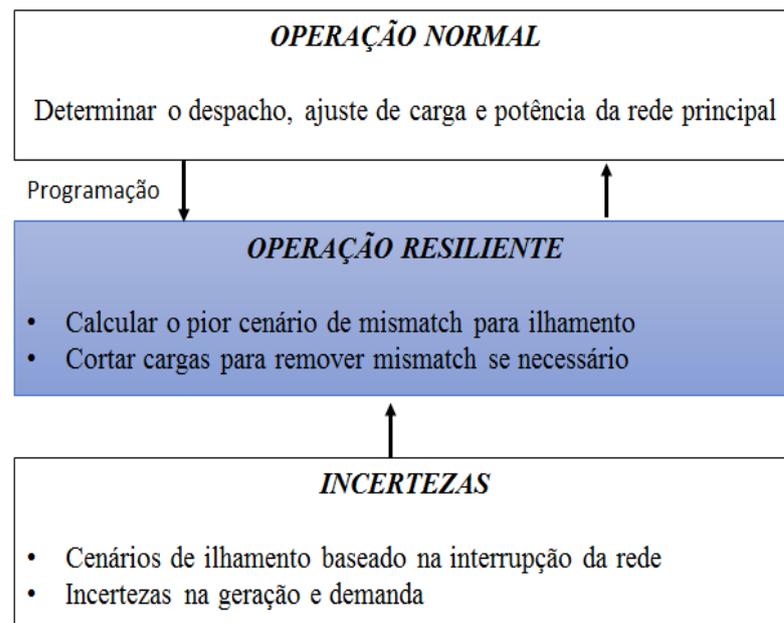
Figura 2.24 - Modos de operação considerando a resiliência



Fonte: Adaptado de KHODAEI, (2014).

Em (KHODAEI, 2014) conforme a Figura 2.25, se propõem uma operação considerando restrições de resiliência. No qual se realiza um despacho em operação normal considerando as possíveis ocorrências de falta e ilhamento da microrrede.

Figura 2.25 - Modos de operação considerando a resiliência



Fonte: Adaptado de KHODAEI, (2014).

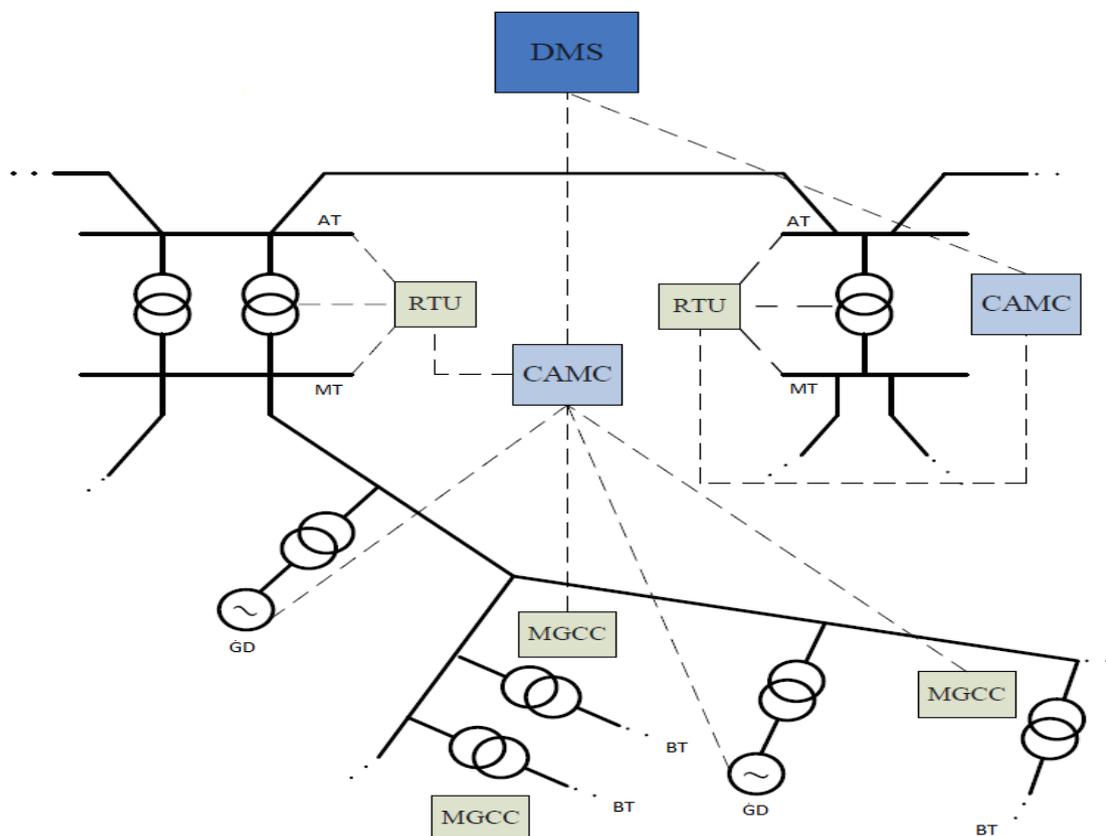
Com base nos modos de operação ilustrados na Figura 2.25, a microrrede assume o estado de conectada ou desconectada da rede de distribuição principal. Ou seja, pode operar em modelos conectados à rede ou ilhada. Na operação ilhada da microrrede poderia fornecer uma solução eficiente para o fornecimento de cargas locais quando a energia da rede principal não está disponível ou a distribuição rede está com defeito.

Na literatura encontra-se vários trabalhos relacionados ao gerenciamento de energia e controle de microrredes. Entretanto levando em consideração apenas uma microrrede, a perspectiva para o futuro, é que as microrredes cooperem de forma colaborativa, atuando em um cenário de Redes Inteligentes (WANG *et al.*, 2015).

2.7 Multi-Microrredes

Multi-Microrredes é um conceito novo que corresponde a uma estrutura de alto nível, formada no nível de média tensão (MT), constituída de várias microrredes de baixa tensão (BT) e geração distribuída (GD), conectados a alimentadores de MT adjacentes. Nesse novo cenário, o grande número de redes de baixa tensão com micro gerações e cargas, que não são mais elementos passivos da rede de distribuição precisam ser operados juntos e de forma coordenada (HATZIARGYRIOU, 2013). Portanto, a complexidade e dimensões do sistema a ser gerenciado aumenta, exigindo uma arquitetura de controle e gerenciamento completamente nova. Esta arquitetura é ilustrada na Figura 2.26.

Figura 2.26 - Arquitetura de Controle e Gerenciamento de um Sistema Multi-Microrredes



Fonte: Adaptado de HATZIARGYRIOU, (2013).

O sistema de gerenciamento de distribuição – *Distribution Management Systems* (DMS) é responsável pela supervisão, controle e gerenciamento de todo o sistema de distribuição. Uma gestão eficaz deste tipo de sistema requer o desenvolvimento de um sistema hierárquico de arquitetura controle, onde o controle será exercido por um controlador intermediário. O controlador de gerenciamento autônomo central – *Central Autonomous Management Controller* (CAMC), instalado no nível do barramento MT de uma subestação de alta tensão (AT) / MT, sob a responsabilidade do operador do sistema de distribuição – *Distribution System Operator* (DSO), responsável pela operação das Multi-Microrredes. Desta forma, a complexidade do sistema pode ser compartilhada entre vários agentes de controle individuais menores, comportando-se como um pequeno DMS que é capaz de resolver o problema de agendamento de unidades geradoras e outros dispositivos de controle instalados no sistema em condições normais e de emergência (LOPES et al., 2013).

Neste contexto, a implantação de uma infraestrutura de comunicação da rede de distribuição é crucial. A infraestrutura de comunicação local gerencia as microrredes de forma mais eficiente e, conseqüentemente, maximizar a integração da GD e da microgeração, especialmente as fontes de energia baseadas em fontes renováveis.

O desenvolvimento do conceito de microrredes levou à necessidade de uma análise detalhada da interação entre o Controlador Central Microrredes – *MicroGrid Central Controller* (MGCC) e o DMS central (operado pelo Operador do Sistema de Distribuição), que é responsável por toda a distribuição.

De maneira similar a microrrede, as multi-microrredes, possuem dois modos principais de operação e estado de funcionamento possíveis. Estes dois modos de operação possíveis são:

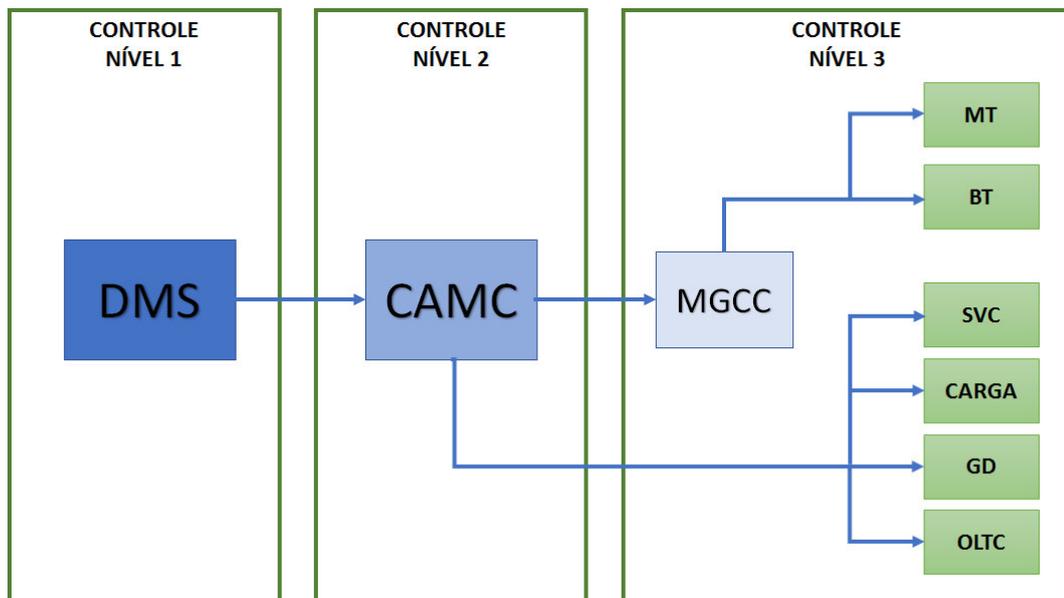
- Modo de funcionamento normal - quando o sistema de multi-microrredes é operado interligado à rede principal de distribuição.
- Modo de funcionamento de emergência - quando o sistema de Multi-Microrredes é operado no modo autônomo (ilhado do sistema de energia principal) ou, após um blecaute, quando o sistema de multi-microrredes está contribuindo para a restauração do serviço.

Um sistema Multi-Microrredes pode ser operado em condições normais ou de emergência. Para estes propósitos, presume-se que o controle da frequência seja implementado em algumas unidades de microgeração e o controle de frequência secundário também esteja disponível. Além disso, uma abordagem hierárquica sistema de controle de frequência está

alojado no CAMC. Portanto, o CAMC controla os MGCCs, unidades GD independentes e também cargas controláveis de MT. MGCCs agem como uma interface entre o CAMC e os componentes internos dos microrredes, de modo que o CAMC não precisa ter o conhecimento detalhado de sua constituição (KUNDUR, 2017) .

O sistema de controle hierárquico de um sistema Multi-Microrredes pode ser representado pelo diagrama de blocos na Figura 2.27.

Figura 2.27 - Esquema de Controle Hierárquico de um Sistema Multi-Microrredes



Fonte: Adaptado de LOPES, (2013).

Estes três níveis principais de controle de um sistema Multi-Microrredes são descritos a seguir:

- Nível de Controle 1 - onde a rede de distribuição de alta tensão é gerenciada por um DMS, responsável por toda a rede de distribuição.
- Nível de Controle 2 - onde a rede de MT é gerenciada por um CAMC, que é responsável por gerenciar várias microrredes junto com unidades GD e cargas controláveis diretamente conectadas a alimentadores de MT.
- Nível de Controle 3 - onde a rede de baixa tensão é gerenciada e controlada por um MGCC. Também vários dispositivos como SVCs e transformadores OLTC estão incluídos neste nível, mas são coordenados pelo CAMC.

As Multi-Microrredes trazem grandes benefícios, como o gerenciamento mais flexível dos recursos energéticos para todas as microrredes. Outro aspecto importante é que com a cooperação energética entre as microrredes tem-se o aumento da resiliência do sistema.

3 MODELO DE OPERAÇÃO DE MICRORREDES

Neste capítulo é apresentado o modelo proposto de operação de microrredes. No qual a metodologia proposta baseia-se no gerenciamento dos recursos enérgicos de duas microrredes através do algoritmo de otimização por enxame de partículas - *Particle Swarm Optimization* (PSO), que tem como função objetivo, minimizar o corte de cargas prioritárias.

3.1 Otimização por enxame de partículas

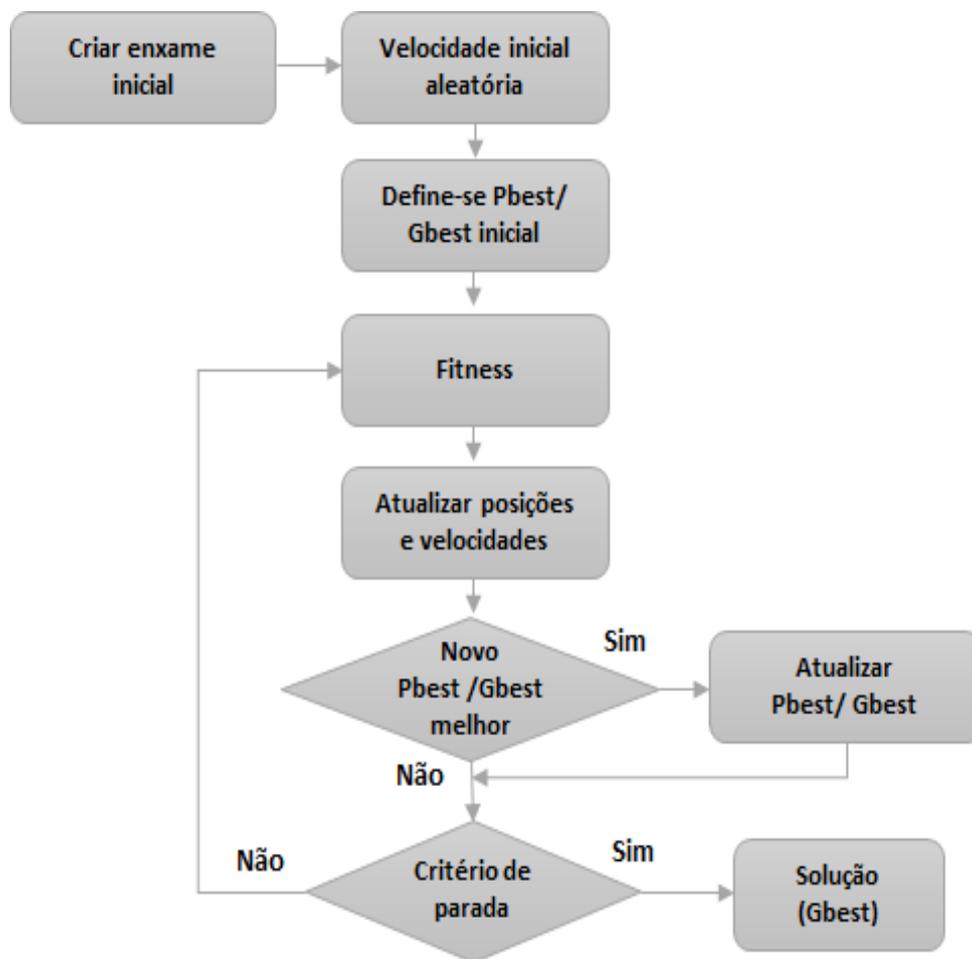
Otimização por enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO) foi desenvolvido por James Kennedy e Russell Elberhart em 1995 para tratar problemas no domínio contínuo. O PSO emergiu de experiências com algoritmos que modelam o “comportamento social” observado em muitas espécies de pássaros e cardumes de peixes, e até mesmo do comportamento social humano. Além disso, o comportamento do enxame sugeriu que os membros individuais do enxame podem se beneficiar das descobertas e da experiência de outros membros do enxame, ou seja, o compartilhamento social da informação pode fornecer uma vantagem evolutiva (MADUREIRA, 2010).

O PSO é uma técnica estocástica que se baseia em população, no qual cada partícula do enxame é candidata à solução do problema. Ele vem sendo aplicado em vários problemas de otimização na engenharia se comparado com outras técnicas, tais como: Algoritmos Genéticos, Estratégias Evolutivas, entre outras. Sua característica de busca global no começo do processo iterativo faz com que as partículas procurem por toda região de busca, sendo que ao longo das iterações a procura torna-se local. Isso faz com que probabilidade de encontrar o ótimo global aumente, garantindo boa exatidão do valor encontrado e possibilitando uma boa representação da região de confiança das partículas (CERQUEIRA et al., 2015).

O algoritmo de otimização por enxame de partículas pode ser descrito brevemente utilizando os seguintes passos: dada uma população inicial de partículas, atualiza-se o vetor

posição a partir do vetor velocidade de cada partícula até que se atinja o critério de parada pré-definido. O PSO resolve a problemática criando uma população de soluções candidatas, que são conhecidas como partículas, então movendo-se estas partículas em torno do espaço de busca, de acordo com fórmulas matemáticas de a posição e velocidade da partícula. Sendo que o algoritmo se guia pela melhor posição pessoal (Pbest), melhor posição geral (Gbest) e pelo movimento das partículas atual, para decidir suas posições seguintes no espaço de busca (DEL VALLE et al., 2008). A Figura 3.1 ilustra essa lógica.

Figura 3.1 - Fluxograma-Algoritmo PSO



Fonte: Autor.

A formulação matemática do algoritmo PSO é apresentada no Anexo A.

3.2 Classificação de Prioridade dos Consumidores dentro das Microrredes

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio da resolução 414, estabelece os critérios para a classificação de consumidores interligados ao sistema elétrico. Segundo esta resolução a concessionária deve classificar a unidade consumidora de acordo com a atividade exercida e a finalidade da energia elétrica. Assim, as unidades consumidoras podem ser classificadas em:

- Residencial e seus subgrupos;
- Industrial;
- Comercial e seus subgrupos;
- Rural e seus subgrupos;
- Poder Público;
- Iluminação Pública, e;
- Serviços Públicos.

A concessionaria deve considerar também os serviços ou atividades essenciais, cujo a interrupção dos mesmos, coloca em risco inerente a sobrevivência, a saúde ou a segurança da população. Em (OLIVEIRA et al., 2015), se classifica os níveis de prioridade e seus respectivos grupos de consumidores conectados à microrredes conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Classificação dos níveis de Prioridades

Classificação	Nível de prioridade	Tipos unidades consumidoras
Classe 1	Alto	Hospitais; serviços de telecomunicação e transporte público; Iluminação pública
Classe 2	Médio	Comercial e Industrial
Classe 3	Baixo	Residencial e rural

3.3 Estudo de Casos

Neste trabalho utilizou-se apenas o módulo de otimização que é o principal de um SGE, no qual, a operação ótima de microrredes visa minimizar o corte de cargas prioritárias, utilizando da melhor maneira os recursos energéticos disponíveis e atendendo as restrições técnicas.

O modelo de gerenciamento de microrredes durante proposto é implementado em dois casos:

- Sistema de gerenciamento das microrredes – (SGM);
- Sistema de gerenciamento de Multi-Microrredes – (SGMM).

Assumindo o sistema é composto por duas microrredes inteligentes e considerando a ocorrência de uma contingência, as microrredes passam a operar em modo isolado. O modelo de operação de microrredes tem por finalidade garantir o fornecimento de energia elétrica priorizando as cargas críticas, por meio do despacho ótimo das fontes.

Nomeia-se neste trabalho como SGM o sistema de gerenciamento de microrredes conforme a Figura 3.2, que é responsável pelo gerenciamento energético das microrredes.

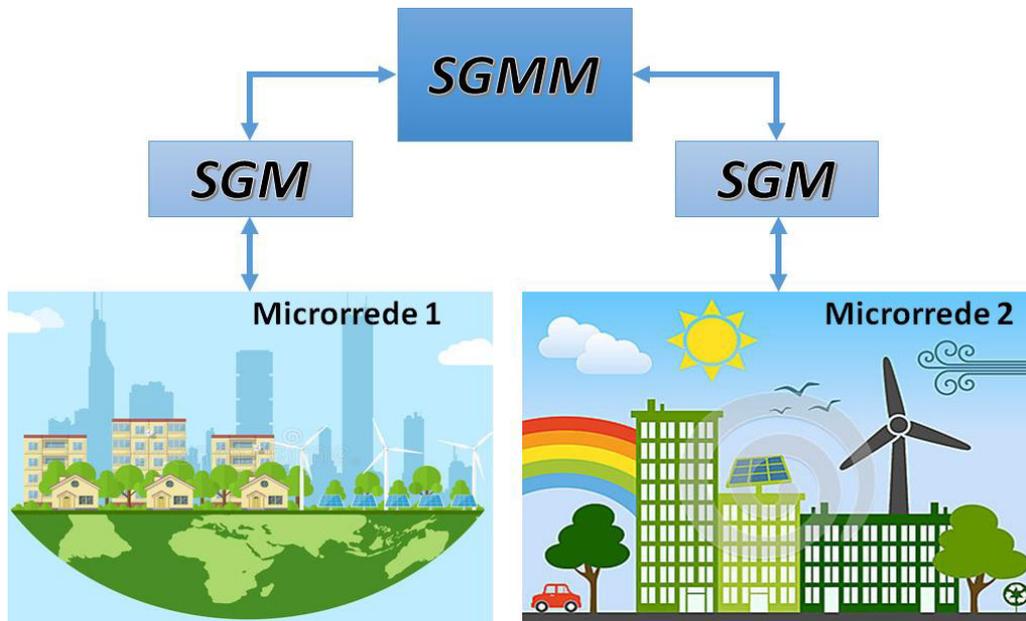
Figura 3.2 - Sistema de Gerenciamento de Microrredes



Fonte: Autor.

E nomeia-se como SGMM o sistema de gerenciamento de multi-microrredes conforme a Figura 3.3, que é responsável pelo gerenciamento energético entre microrredes.

Figura 3.3 - Sistema de Gerenciamento de Multi-Microrredes



Fonte: Autor.

O modelo de Operação de Microrredes opera da seguinte maneira. Com a ocorrência de uma contingência, as microrredes passam a operar no modo ilhado da rede principal. A gestão de recursos energéticos das microrredes são gerenciados através do algoritmo de otimização por enxame de partículas - *Particle Swarm Optimization* (PSO), que tem como função objetivo, minimizar o corte de cargas prioritárias, utilizando da melhor maneira os recursos energéticos disponíveis. Deste modo, tem-se um problema de programação não linear que:

$$\min f = \sum_{i=1}^n (Ploss, i) \quad (3.1)$$

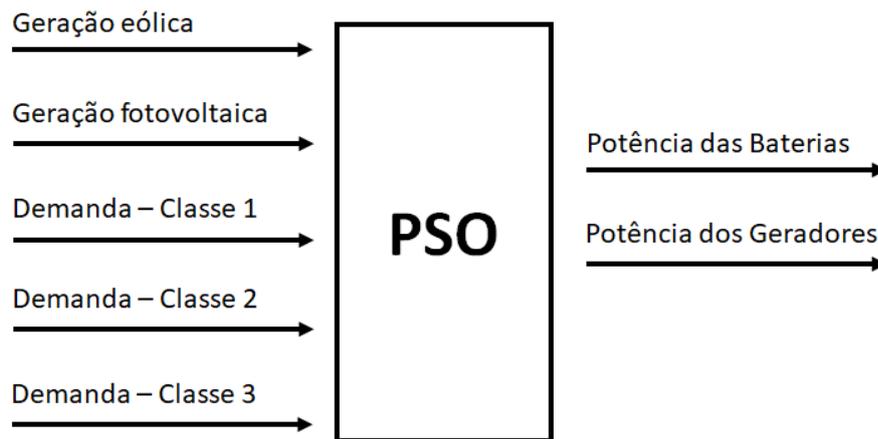
Em que *Ploss* é a perda de carga em cada instante de tempo *i*;

As microrredes usadas como teste neste trabalho são compostas por gerações fotovoltaica (PV) e eólicas (PW), geradores a diesel (PG) e banco de baterias (PB). Os dados utilizados de geração fotovoltaica são obtidos da microrrede isolada da Ilha Grande e da geração

eólica são obtidos da microrrede de Ilha dos Lençóis, ambas no Maranhão. As curvas de demandas foram baseadas nas curvas típicas de carga curva do SIN, elas obedecem a classificação de prioridades expostas na seção 3.2 deste trabalho.

No SGM o algoritmo PSO é responsável por fazer o gerenciamento os recursos despacháveis: potências das baterias e dos geradores.

Figura 3.4 - Gerenciamento energético realizado com o algoritmo PSO no SGM



Fonte: Autor.

O SGM e o SGMM são implementados para minimizar o corte de cargas prioritárias das microrredes. Para isso leva-se em consideração as restrições de balanço energético e as demais restrições de custo operativo.

- *Restrição para o balanço energético:*

$$P_{B,i} + P_{V,i} + P_{W,i} + P_{G,i} = P_{L,i} \quad (3.2)$$

Sendo P_B a potência do banco de baterias, P_V a potência fotovoltaica, P_W é a potência eólica, P_G é a potência do gerador diesel e P_L a demanda do sistema.

- *Baterias:*

A potência das baterias deve respeitar as restrições operacionais de máximo e mínimo de capacidade de armazenamento:

$$P_B^{min} \leq P_B \leq P_B^{max} \quad (3.3)$$

Para aumentar a vida útil das baterias um fator importante é o seu estado de carga. Atender os limites de estado de carga prevenindo descargas profundas e sobrecargas. Assim para o cálculo da energia em cada instante de tempo temos:

$$Soc_i = Soc_{i-1} - P_{B,i} \cdot \Delta t \quad (3.4)$$

em que Soc_i é a energia armazenada no instante de tempo i e Δt é o intervalo de tempo.

Assumindo-se os valores positivos para descarga da bateria e negativos para carga. Respeitando-se as restrições de limites máximo e mínimo do estado de carga conforme a expressão 10.

$$Soc_{min} \leq Soc \leq Soc_{max} \quad (3.5)$$

- *Gerador diesel:*

Os geradores devem respeitar as restrições operacionais de máximo e mínimo de geração:

$$P_G^{min} \leq P_G \leq P_G^{max} \quad (3.6)$$

- *Demanda:*

Para garantir o atendimento das classes de demanda críticas, uma abordagem mais comum para o algoritmo de meta-heurística é aplicar função de penalidade na função objetivo.

As penalidades são aplicadas no caso de não atendimento de uma determinada classe de demanda.

Neste caso, para um problema de minimização, a função objetivo é modificada e adicionando-se penalidades, como:

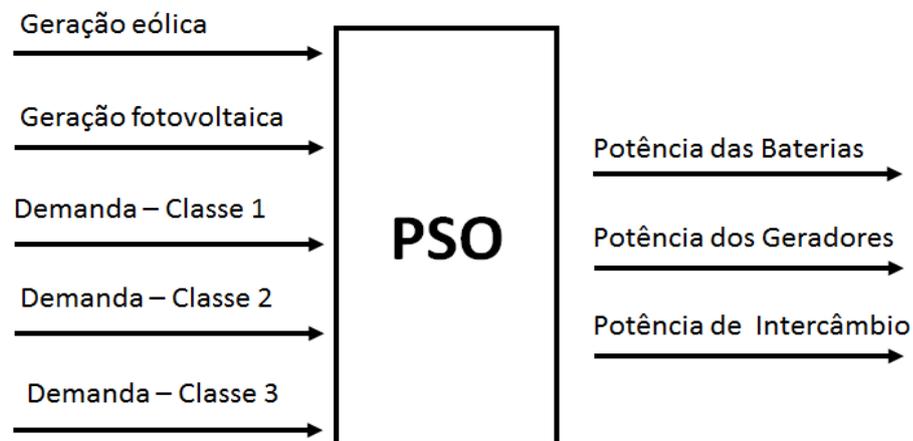
$$f = Ploss * Penalidade \quad (3.7)$$

A penalidade é uma restrição violada multiplicada por um coeficiente. Os coeficientes de penalidades são um valor que tem o mesmo tamanho do valor da função objetivo, as penalidades para da classe de demanda são apresentadas a seguir:

- Demanda Classe 1: Penalidade = 2;
- Demanda Classe 2: Penalidade = 1,5;
- Demanda Classe 3: Penalidade = 1,1.

No SGMM além do gerenciamento das fontes despacháveis, também é realizada a gestão do intercâmbio de energia entre as microrredes.

Figura 3.5 - Gerenciamento energético realizado com o algoritmo PSO no SGMM



Fonte: Autor.

O SGMM tem como principal objetivo realizar o intercâmbio de energia entre microrredes, buscando minimizar o corte de cargas prioritárias das microrredes, obedecendo as restrições operacionais de exportação/importação de energia das microrredes, no qual duas microrredes M1 e M2 podem exportar energia (P_{EX}) ou pode importar energia (P_{IM}) uma da outra, em um determinado intervalo de tempo, conforme as equações a seguir:

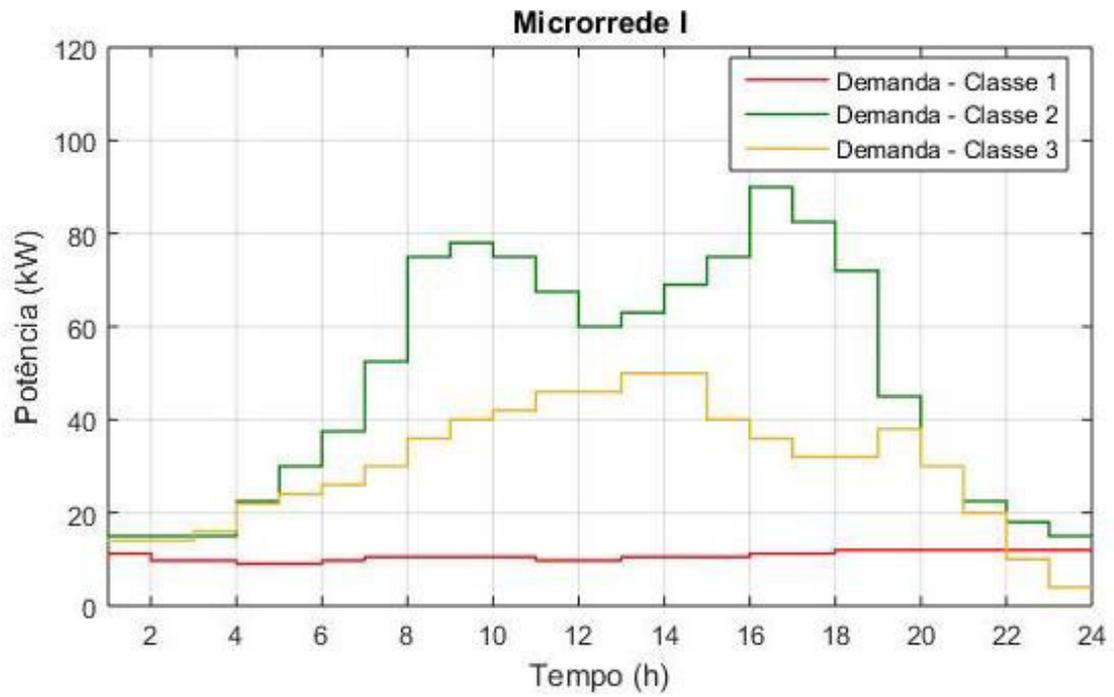
$$0 \leq P_{EX(M1,M2)} \leq P_{EX(M1,M2)}^{max} \quad (3.8)$$

$$0 \leq P_{IM(M1,M2)} \leq P_{IM(M1,M2)}^{max} \quad (3.9)$$

Para as simulações, as gerações renováveis têm prioridade, pois são não despacháveis fontes. Neste caso, PW, PV e as baterias, têm prioridade no despacho, entretanto o SOC das baterias deve ser monitorado. Se essas fontes não puderem fornecer a carga solicitada, os geradores a diesel devem ser usados para complementar a demanda.

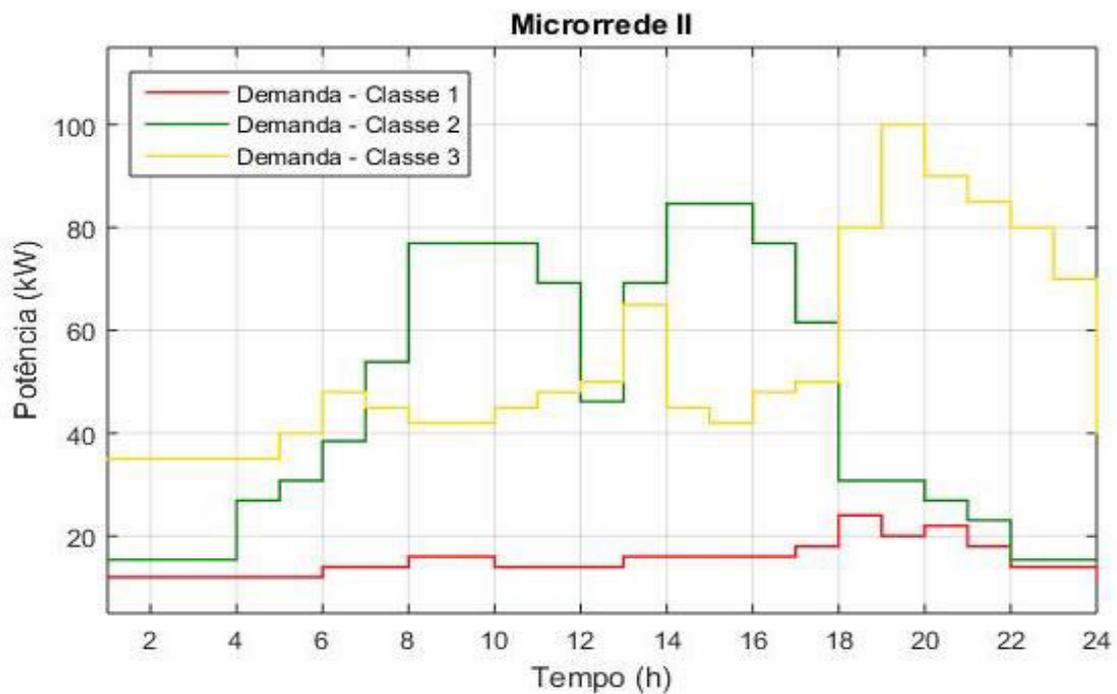
Os perfis de demanda para cada classe de prioridades das microrredes 1 e 2 podem ser vistos nas Figuras 3.6 e 3.7 respectivamente.

Figura 3.6 - Perfil das classes de demanda da microrrede 1



Fonte: Autor.

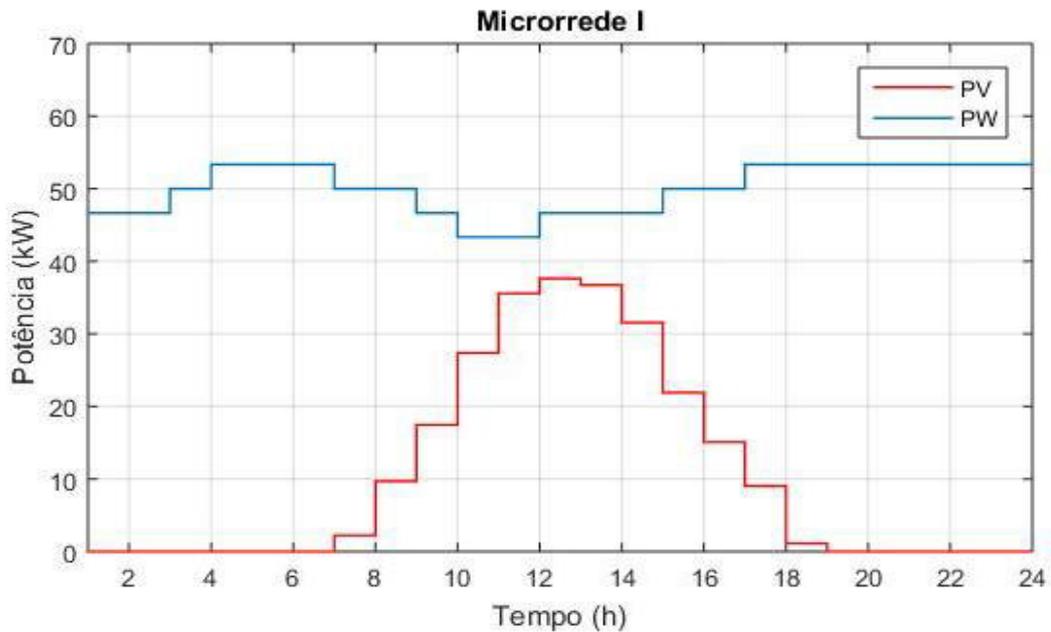
Figura 3.7 - Perfil das classes de demanda da microrrede 2



Fonte: Autor.

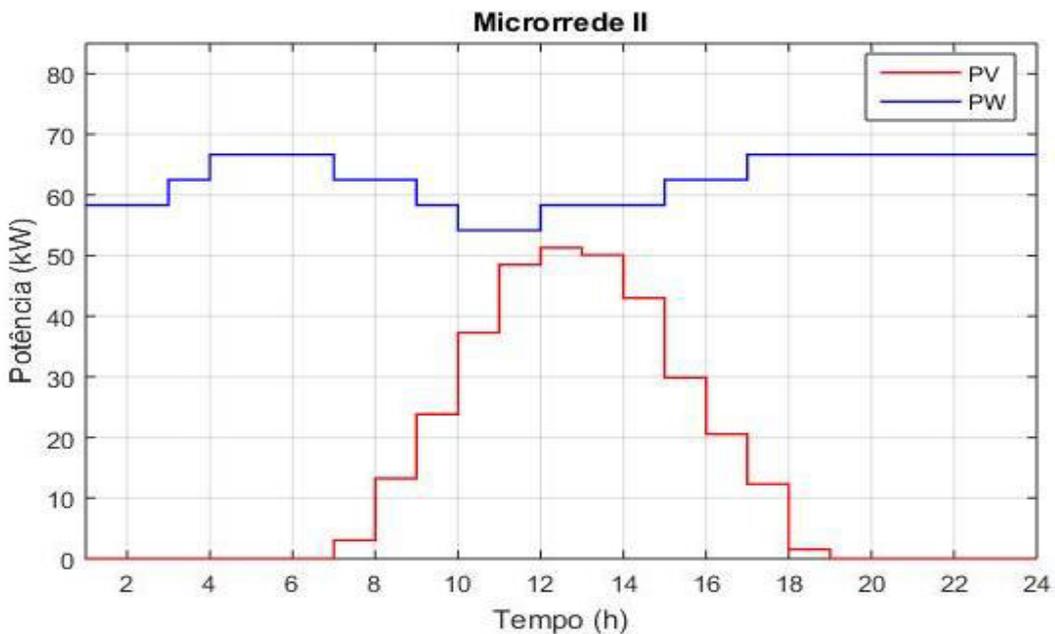
As potências disponíveis de PW e PV para microrrede 1 e 2 podem ser vistas nas Figuras 3.8 e 3.9 respectivamente. No qual, os dados utilizados de geração fotovoltaica foram obtidos da microrrede isolada da Ilha Grande e dados de geração eólica obtidos da microrrede de Ilha dos Lençóis.

Figura 3.8 - Potência de saída da geração eólica e fotovoltaica da microrrede 1



Fonte: Autor.

Figura 3.9 - Potência de saída da geração eólica e fotovoltaica da microrrede 2



Fonte: Autor.

Os parâmetros PSO são considerados os mesmos para todas as simulações. Sendo estes o número máximo de iterações (itermax), o tamanho da população (npop), o peso de inercia máximo e mínimo (wmax e wmin), e os coeficientes de aprendizagem (C1 e C2). Os parâmetros são itermax = 1000, npop = 100, wmax = 0,9, wmin = 0,4, c1 = 2,0 e c2 = 2,0. Em todos os casos, as simulações são realizadas 20 vezes para garantir soluções de qualidade não dependentes da solução inicial obtida pelo algoritmo PSO. Todas as simulações realizadas foram feitas no software *Matlab*®.

Neste trabalho utiliza-se a discretização do tempo em 1h para um planejamento de 24h, considera-se que todas as variáveis do sistema são constantes nesse intervalo de tempo. No entanto a metodologia também é apropriada para intervalos menores.

Os parâmetros da bateria e do gerador diesel para simulação podem ser observados nas Tabelas 3.2 e 3.3.

Tabela 3.2 - Parâmetros do Gerador Diesel e Bateria da Microrrede 1

Parâmetros do Gerador Diesel (kW)			
PGmin		PGmax	
10		20	
Parâmetros da Bateria			
SOCmin (%)	SOCmax (%)	SOCini (%)	PB(kW)
50	100	75	-30/30

Tabela 3.3 - Parâmetros do Gerador Diesel e Bateria da Microrrede 2

Parâmetros do Gerador Diesel (kW)			
PGmin		PGmax	
20		40	
Parâmetros da Bateria (kWh)			
SOCmin (%)	SOCmax (%)	SOCini (%)	PB(kW)
50	100	75	-60/60

Na tabela 3.4 pode-se observar os parâmetros operacionais de exportação/importação de energia das microrredes M1 e M2.

Tabela 3.4 - Parâmetros exportação/importação de energia das microrredes

Parâmetros exportação/importação de energia das microrredes			
PM1 (kW)		PM2 (kW)	
P_{EX} (max)	P_{IM} (max)	P_{EX} (max)	P_{IM} (max)
80	80	100	100

4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações realizadas, assim como suas análises utilizando o PSO, como algoritmo de otimização em dois estudos de caso. No Caso 1 é implementado o Sistema de gerenciamento das microrredes individualmente, com duas microrredes operando de forma individual, sem colaboração de energia. Já no Caso 2 é implementado o Sistema de Gerenciamento de Multi-Microrredes, no qual se tem duas microrredes operando de forma colaborativa.

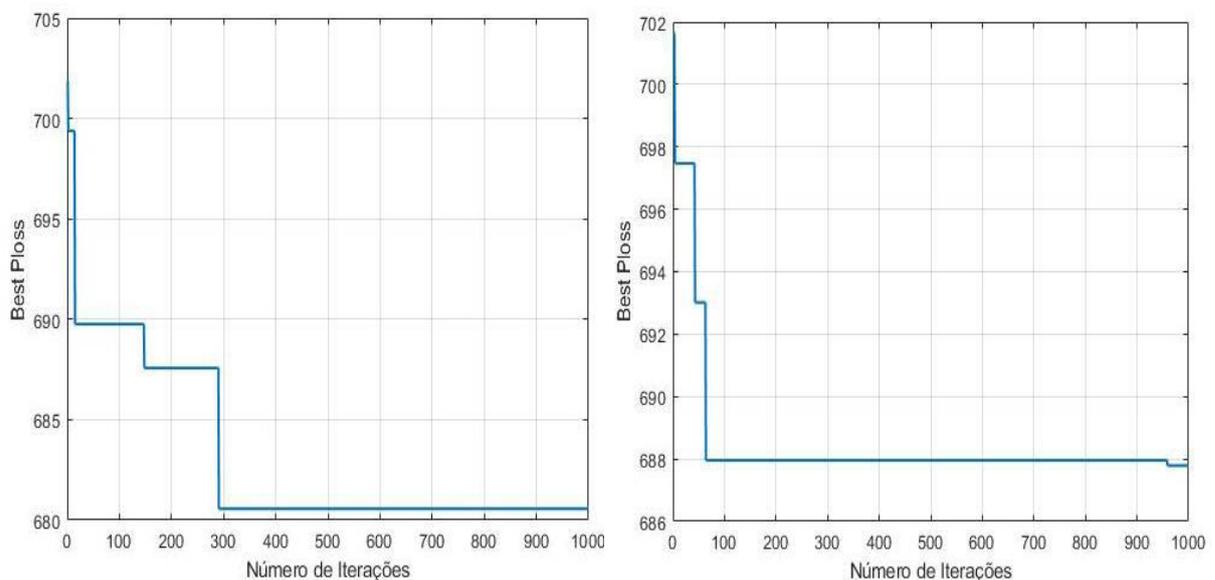
Para as simulações em ambos os casos se utilizou as mesmas microrredes. Nos quais os dados dos perfis de demanda e as potências de saídas de PV e PW foram apresentados no capítulo anterior.

4.1 Caso 1 – Sistema de gerenciamento das microrredes individualmente

Para o caso 1, tem-se duas microrredes operando de forma individual. Considerando-se a ocorrência de uma contingência, no qual as microrredes passam a operar em modo isolado, implementou-se o SGM para o gerenciamento de cada microrrede.

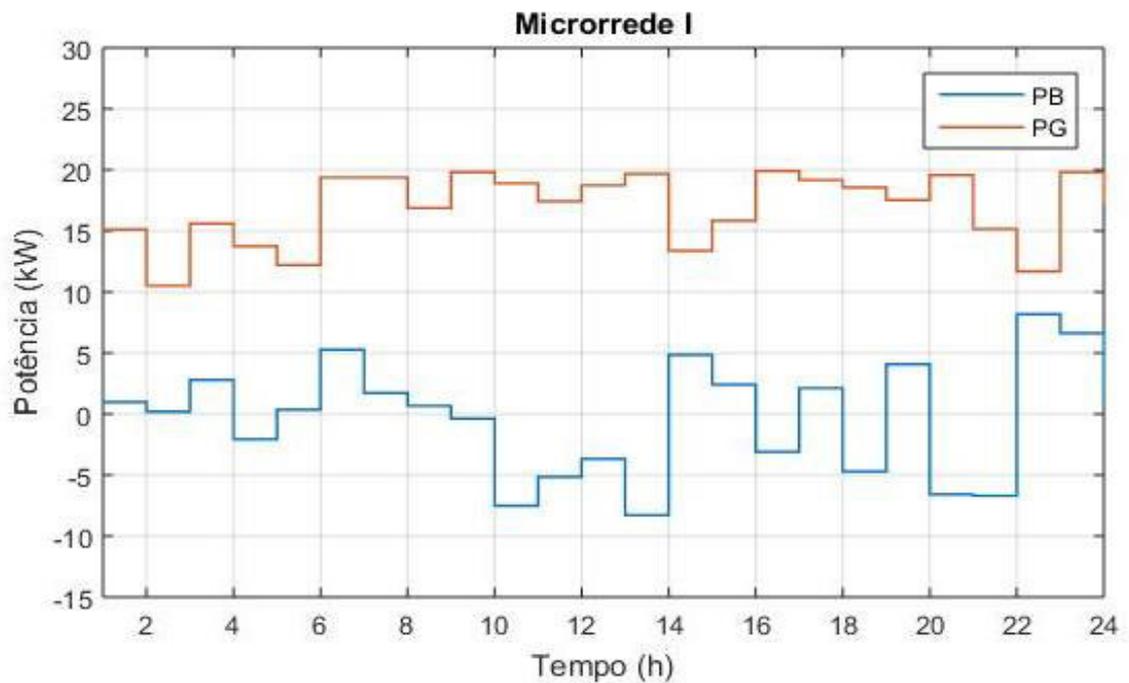
Na Figura 4.1 são mostradas as curvas de convergência do algoritmo SGM para as microrredes 1 e 2 respectivamente, apesar de 1000 iterações consideradas como critério de parada, o algoritmo convergiu antes para ambas as microrredes.

Figura 4.1 - Curvas de Convergência do SGM das Microrredes 1 e 2 respectivamente



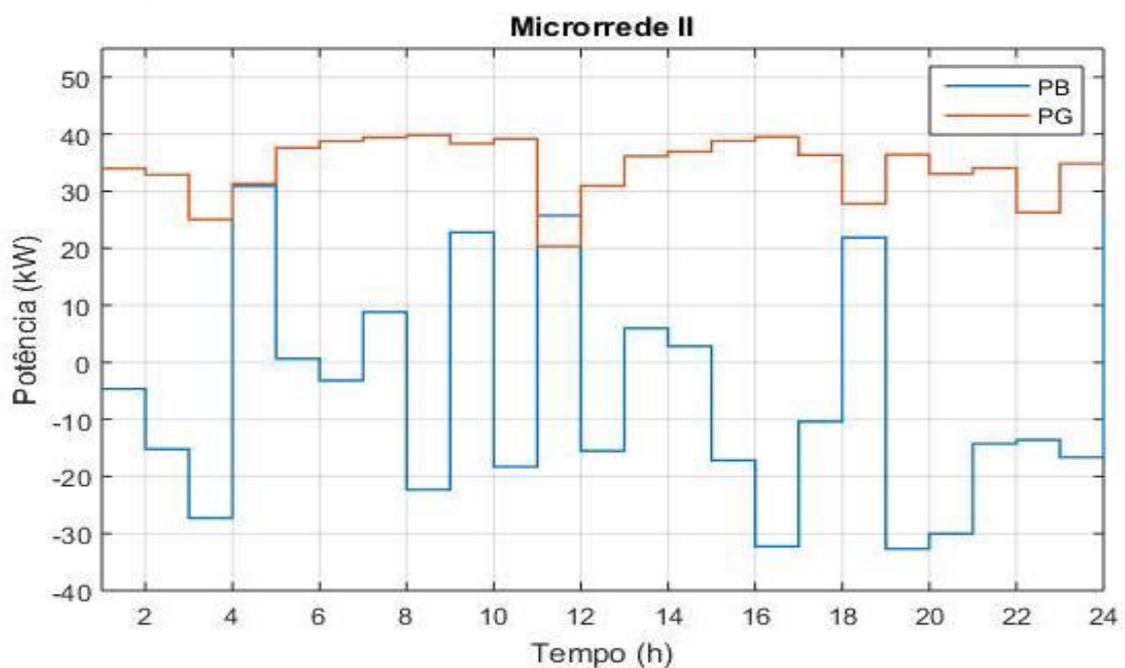
A composição das fontes despacháveis das microrredes podem ser observadas nas Figuras 4.2 e 4.3, onde percebe-se que as baterias são bastante utilizadas em ambas as microrredes, principalmente nos horários em que a demanda é maior. Os geradores a diesel atuaram de forma a ajudar a complementar a demanda.

Figura 4.2 - Composição das fontes despacháveis das microrredes 1 (Caso 1)



Fonte: Autor.

Figura 4.3 - Composição das fontes despacháveis das microrredes 2 (Caso 1)



Fonte: Autor.

No modelo de Operação Resiliente de Microrredes com o SGM pode-se observar a eficiência minimização do corte de cargas prioritárias das microrredes, os resultados obtidos para as microrredes estão expostas nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 - Resultado obtidos de demanda atendida para a Microrrede 1

<i>Hora</i>	<i>Demanda Atendida Classe 1</i>	<i>Demanda Atendida Classe 2</i>	<i>Demanda Atendida Classe 3</i>
<i>1</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>2</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>3</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>4</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>5</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>6</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>7</i>	100,00%	100,00%	10,50%
<i>8</i>	100,00%	83,99%	0,00%
<i>9</i>	100,00%	98,01%	0,00%
<i>10</i>	100,00%	100,00%	4,88%
<i>11</i>	100,00%	100,00%	44,11%
<i>12</i>	100,00%	100,00%	64,83%
<i>13</i>	100,00%	100,00%	54,92%
<i>14</i>	100,00%	100,00%	39,09%
<i>15</i>	100,00%	100,00%	16,59%
<i>16</i>	100,00%	75,71%	0,00%
<i>17</i>	100,00%	82,72%	0,00%
<i>18</i>	100,00%	85,48%	0,00%
<i>19</i>	100,00%	100,00%	41,43%
<i>20</i>	100,00%	100,00%	89,38%
<i>21</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>22</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>23</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>24</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>Demanda Atendida Total</i>	100,00%	96,91%	56,91%

Tabela 4.2 - Resultado obtidos de demanda atendida para a Microrrede 2

<i>Hora</i>	<i>Demanda Atendida Classe 1</i>	<i>Demanda Atendida Classe 2</i>	<i>Demanda Atendida Classe 3</i>
<i>1</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>2</i>	100,00%	100,00%	95,82%
<i>3</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>4</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>5</i>	100,00%	100,00%	88,56%
<i>6</i>	100,00%	100,00%	42,73%
<i>7</i>	100,00%	100,00%	33,53%
<i>8</i>	100,00%	57,77%	0,00%
<i>9</i>	100,00%	71,98%	0,00%
<i>10</i>	100,00%	79,01%	0,00%
<i>11</i>	100,00%	97,19%	0,00%
<i>12</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>13</i>	100,00%	100,00%	39,05%
<i>14</i>	100,00%	85,03%	0,00%
<i>15</i>	100,00%	94,88%	0,00%
<i>16</i>	100,00%	67,86%	0,00%
<i>17</i>	100,00%	79,19%	0,00%
<i>18</i>	100,00%	100,00%	40,80%
<i>19</i>	100,00%	100,00%	26,03%
<i>20</i>	100,00%	100,00%	39,88%
<i>21</i>	100,00%	100,00%	56,51%
<i>22</i>	100,00%	100,00%	40,14%
<i>23</i>	100,00%	100,00%	92,23%
<i>24</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>Demanda Atendida Total</i>	100,00%	93,04%	45,64%

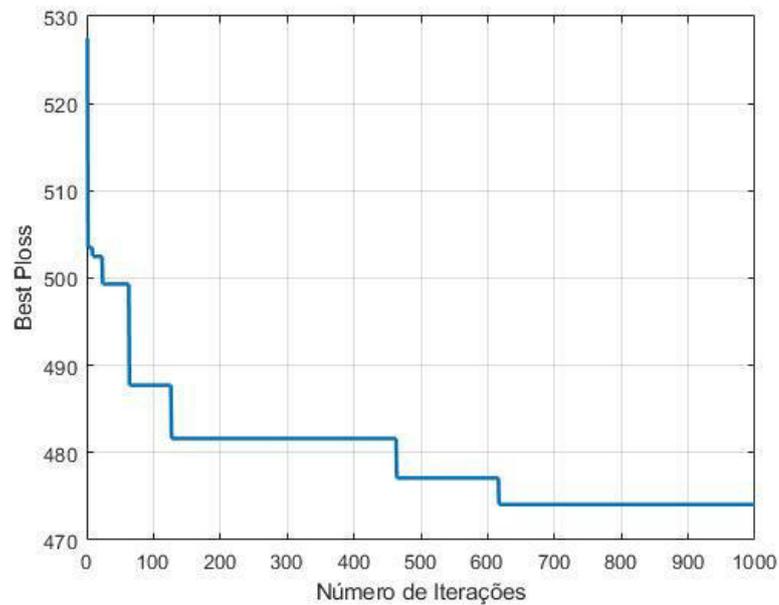
Com o sistema de gerenciamento das microrredes individualmente – SGM, os recursos energéticos e o sistema de armazenamento são capazes de suprir com eficiência o atendimento a demandas críticas, entretanto em alguns horários não se consegue atender as demandas não críticas.

4.2 Caso 2 – Sistema de gerenciamento de Multi-Microrredes

Para o caso 2, tem-se duas microrredes operando de forma colaborativa. Considerando-se a ocorrência de uma contingência, no qual as microrredes passam a operar em modo isolado colaborando uma com a outra, implementou-se o SGMM para o gerenciamento das microrredes.

Na Figura 4.4 é mostrada a curva de convergência do algoritmo SGMM.

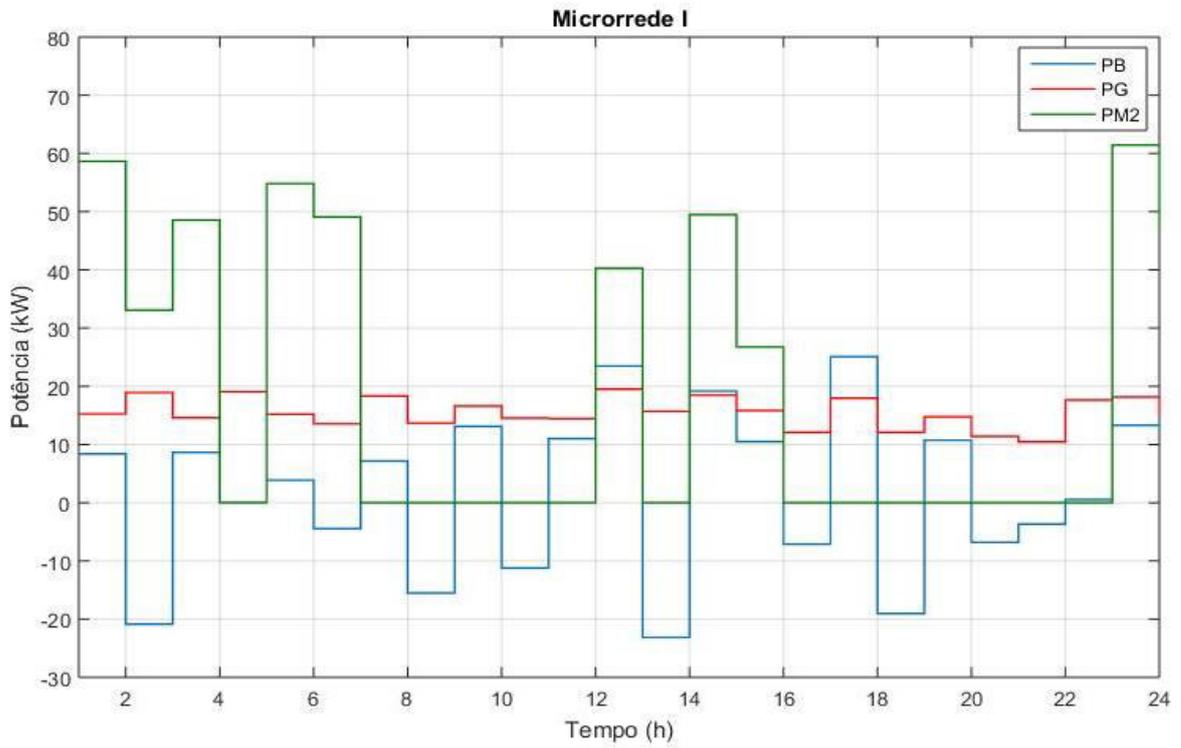
Figura 4.4 - Curvas de Convergência do SGM



Fonte: Autor.

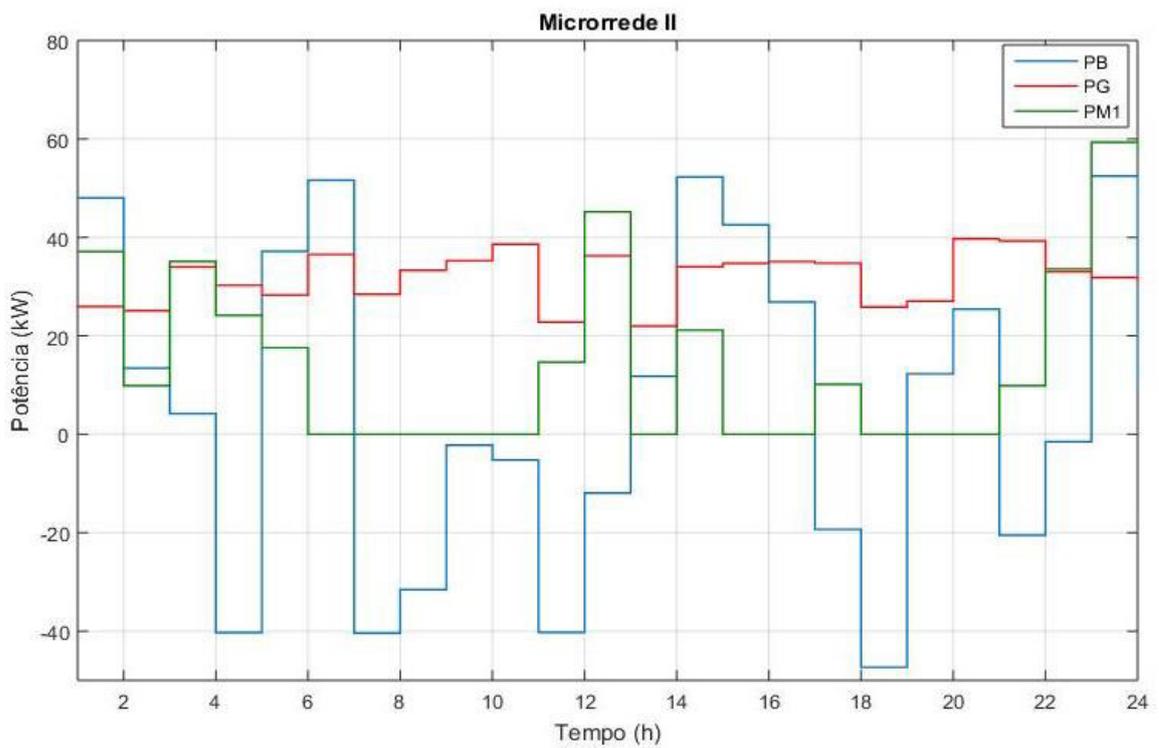
A composição das fontes despacháveis das microrredes e as potência de importação de energia PM1 e PM2, podem ser observadas nas Figura 4.5 e 4.6, onde percebe-se que com a colaboração as microrredes apresentarão uma melhora significativa nos resultados de atendimento as demandas prioritárias.

Figura 4.5 - Composição das fontes despacháveis das microrredes 1 (Caso 2)



Fonte: Autor.

Figura 4.6 - Composição das fontes despacháveis das microrredes 1 (Caso 2)



Fonte: Autor.

No modelo de Operação de Microrredes com o SGMM pode-se observar a eficiência na minimização do corte de cargas prioritárias das microrredes, os resultados obtidos para as microrredes estão expostas nas Tabelas 4.3 e 4.4.

Tabela 4.3 - Resultado obtidos de demanda atendida para a Microrrede 1

<i>Hora</i>	<i>Demanda Atendida Classe 1</i>	<i>Demanda Atendida Classe 2</i>	<i>Demanda Atendida Classe 3</i>
<i>1</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>2</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>3</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>4</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>5</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>6</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>7</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>8</i>	100,00%	100,00%	2,37%
<i>9</i>	100,00%	100,00%	87,13%
<i>10</i>	100,00%	100,00%	40,53%
<i>11</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>12</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>13</i>	100,00%	100,00%	53,90%
<i>14</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>15</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>16</i>	100,00%	100,00%	7,02%
<i>17</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>18</i>	100,00%	82,26%	0,00%
<i>19</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>20</i>	100,00%	100,00%	99,77%
<i>21</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>22</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>23</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>24</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>Demanda Atendida Total</i>	100,00%	99,26%	82,95%

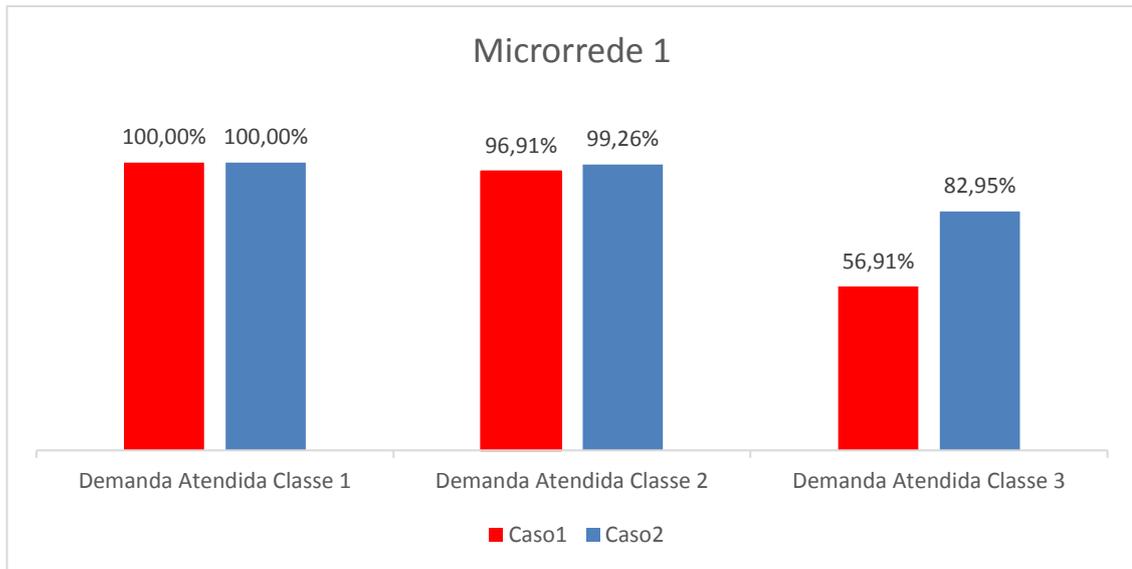
Tabela 4.4 - Resultado obtidos de demanda atendida para a Microrrede 2

<i>Hora</i>	<i>Demanda Atendida Classe 1</i>	<i>Demanda Atendida Classe 2</i>	<i>Demanda Atendida Classe 3</i>
<i>1</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>2</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>3</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>4</i>	100,00%	100,00%	86,53%
<i>5</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>6</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>7</i>	100,00%	53,79%	0,00%
<i>8</i>	100,00%	60,54%	0,00%
<i>9</i>	100,00%	98,87%	0,00%
<i>10</i>	100,00%	100,00%	22,43%
<i>11</i>	100,00%	94,55%	0,00%
<i>12</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>13</i>	100,00%	100,00%	55,15%
<i>14</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>15</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>16</i>	100,00%	100,00%	58,48%
<i>17</i>	100,00%	100,00%	12,04%
<i>18</i>	100,00%	62,96%	0,00%
<i>19</i>	100,00%	100,00%	46,45%
<i>20</i>	100,00%	100,00%	84,74%
<i>21</i>	100,00%	100,00%	55,01%
<i>22</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>23</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>24</i>	100,00%	100,00%	100,00%
<i>Demanda Atendida Total</i>	100,00%	94,61%	63,37%

Os resultados demonstram um papel fundamental do gerenciamento energético de microrredes para atender demandas críticas, principalmente na ocorrência de contingências.

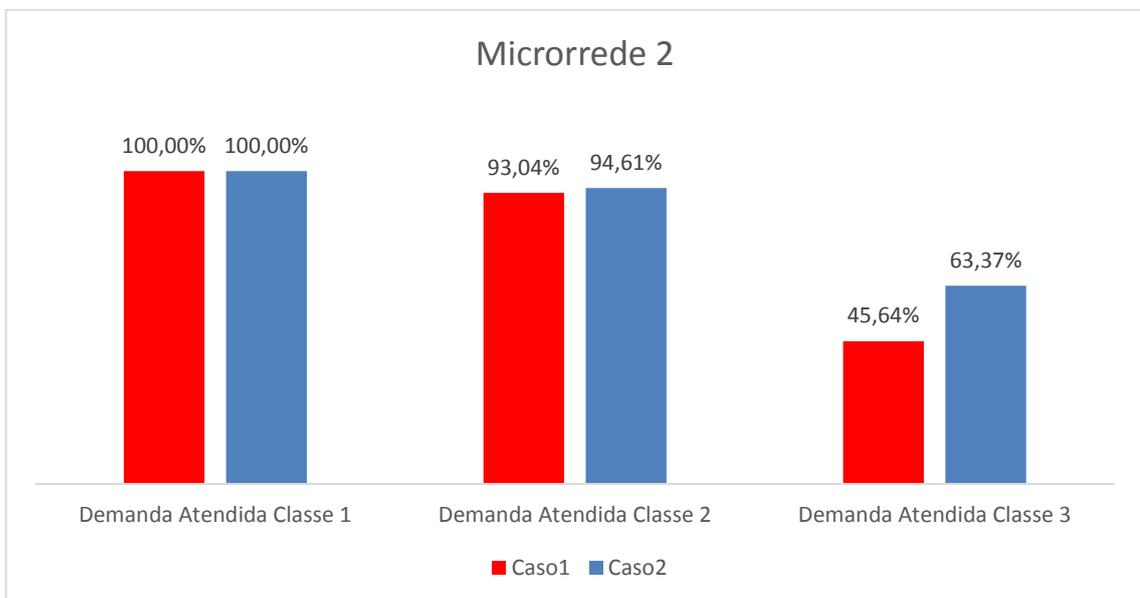
Comparando os dois casos, quanto ao atendimento a demandas prioritárias se observa que atendimento a demandas críticas se mostrou eficiente em ambos os casos. Já o no atendimento a cargas não críticas, observa-se que com a colaboração entre as microrredes obtive-se uma melhora relativa no atendimento as demandas não críticas, evidenciando o aumento da resiliência do sistema. Nas Figuras 4.7 e 4.8 pode-se observar o comparativo entre os dois estudos de casos.

Figura 4.7 - Resultado comparativo das demandas atendidas para a Microrrede 1



Fonte: Autor.

Figura 4.8 - Resultado comparativo das demandas atendidas para a Microrrede 2



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÃO

O crescente desenvolvimento das microrredes impulsionado pela necessidade de suprir os consumidores de forma mais estável e confiável traz consigo novos desafios, principalmente no que tange a operação em modo isolado.

Na operação de microrredes modo isolado visa-se minimizar a diferença entre a geração e demanda, garantindo o mínimo possível de corte de carga, até que a rede principal volte ao estado normal de operação.

Microrredes operando isoladas, sem a presença de outras, possuem energia limitada, podendo incidir em cortes de cargas no curto espaço de tempo. Já microrredes operando isoladas de forma colaborativa permitem que haja um melhor atendimento a demanda.

O gerenciamento energético de microrredes possui um papel fundamental no atendimento de demandas críticas, principalmente na ocorrência de contingências.

Desta forma, esse trabalho teve com principal motivação o desenvolvimento de um modelo de operação de microrredes considerando a operação isolada do sistema elétrico principal e a necessidade de manter o fornecimento de energia elétrica para as cargas prioritárias.

O modelo proposto neste trabalho mostrou que a operação de microrredes principalmente de forma colaborativa apresenta uma grande eficiência na minimização do corte de cargas prioritárias, evidenciando o aumento da resiliência do sistema.

Os resultados obtidos permitem afirmar que o modelo proposto atingiu seu principal objetivo, sendo de fácil implementação e robusto, além de ser versátil, podendo ser adaptada facilmente as novas abordagens.

Apesar das melhorias trazidas pelas modernizações das redes de energia elétricas, as mesmas ainda, necessitam de grandes investimentos em diversas áreas, como pesquisa, infraestrutura e segurança.

E por fim, como sugestões para trabalhos futuros, podemos citar os seguintes aspectos:

- Inclusão de mais microrredes para aumento da flexibilidade do sistema;
- Implementar o modulo de controle inteligente distribuído mais apropriado a *Smart Grids*;
- Inclusão de novas fontes de geração.

REFERÊNCIAS

- AHMAD KHAN, Aftab et al. **A compendium of optimization objectives, constraints, tools and algorithms for energy management in microgrids. Renewable and Sustainable Energy Reviews.** [S.l: s.n.], 2016
- ALIMARDANI, A.; KESHTKAR, H.; ABDI, Babak. Optimization of fuel consumption in micro-turbines. **Energy Procedia**, v. 12, p. 779–788, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.10.104>>.
- ASHABANI, Seyed Mahdi; MOHAMED, Yasser Abdel Rady I. General interface for power management of micro-grids using nonlinear cooperative droop control. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2013.
- BAHRAMIRAD, Shay et al. **Building Resilient Integrated Grids: One neighborhood at a time. IEEE Electrification Magazine.** [S.l: s.n.], 2015
- BEI LI; XIAOQING XIU. Study on energy storage system investment decision based on real option theory. 2012, [S.l: s.n.], 2012.
- BOCCHI, Nerilso; FERRACIN, Luiz Carlos; BIAGGIO, Sonia Regina. Pilhas e Baterias: Funcionamento e Impacto Ambiental. **Quim. Nova Esc.**, 2000.
- CASTRO, Rui M G. INTRODUÇÃO À ENERGIA EÓLICA Rui M.G. Castro. v. 2003, n. edição 1, 2003.
- CERQUEIRA, Signey; SAAVEDRA, Osvaldo; LIMA, Shigeaki. Microgrid Economic Dispatch With Storage Systems by Particle Swarm Optimization. **XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)**, n. October, p. 1–6, 2015.
- CIGRE. WG C6.22 Microgrids. 2012, [S.l: s.n.], 2012. p. 2012. Disponível em: <www.cigre.org>.
- COSTA, Dreifus M. Aspecto técnicos e operacionais do uso de microturbinas conectadas aos sistemas elétricos para a geração distribuída de energia elétrica. **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS)**, p. 1–146, 2010. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8480/COSTA%20DREIFUS%20MEDEIROS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.
- CRESESB. Energia Eólica: Princípios e Tecnologia. p. 58, 2008. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf>.
- DE SOUZA RIBEIRO, Luiz Antonio et al. Isolated micro-grids with renewable hybrid generation: The case of Lençóis island. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 2, n. 1, p. 1–11, 2011.
- DEL VALLE, Yamille et al. **Particle swarm optimization: Basic concepts, variants and applications in power systems. IEEE Transactions on Evolutionary Computation.** [S.l: s.n.], 2008

DIMEAS, Aris L.; HATZIARGYRIOU, Nikos D. Operation of a multiagent system for microgrid control. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 20, n. 3, p. 1447–1455, 2005.

ELÉTRICA, Agência Nacial de Energia. Atlas Energia Elétrica do Brasil Capítulo 6. **Panorama**, p. 18, 2005. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica(3).pdf)>.

FARRET, Felix A.; SIMÕES, M. Godoy. **Integr. Altern. Sources Energy**. [S.l: s.n.], 2006.

FERRAZ, ANA LUIZA FERREIRA; DO CARMO, MARLON JOSÉ; OLIVEIRA; OLIVEIRA, ÂNGELO ROCHA; ARAÚJO JUNIOR, Lindolpho de Oliveira. Aplicações de Armazenadores de Energia em Sistemas Elétricos de Potência: A Necessidade de Inserção em Currículos de Ensino em Engenharia e Estudo de Caso para SMES. 2012, [S.l: s.n.], 2012.

HATZIARGYRIOU, Nikos. **Microgrids Archit. Control**. [S.l: s.n.], 2013.

HATZIARGYRIOU, Nikos.. MICROGRIDS – Large Scale Integration of Micro-Generation to Low Voltage Grids. **Proc. CIGRE Gen. Session, Paris, France, Paper no. C6-309**, n. Lv, p. 1–24, 2006.

IBRAHIM, Hussein; ILINC, Adrian. Techno-Economic Analysis of Different Energy Storage Technologies. **Energy Storage - Technol. Appl**. [S.l: s.n.], 2013. .

ISMAIL, M. S.; MOGHAVVEMI, M.; MAHLIA, T. M.I. Current utilization of microturbines as a part of a hybrid system in distributed generation technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 21, p. 142–152, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.006>>.

KELLY-PITOU, Katrina M. et al. Microgrids and resilience: Using a systems approach to achieve climate adaptation and mitigation goals. **Electricity Journal**, 2017.

KHODAEI, Amin. Resiliency-oriented microgrid optimal scheduling. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2014.

KUNDUR, Prabha S. Power system dynamics and stability. **Power Syst. Stab. Control. Third Ed**. [S.l: s.n.], 2017. .

LEITE NETO, Pedro Bezerra. Contribuições para a operação energética e econômica de microrredes isoladas com fontes renováveis. **Tese (Doutorado em Eng. Eletr. - Univ. Fed. do Maranhão)**. [S.l: s.n.], 2017. p. 162 f.

LIDEN, David; REDDY, Thomas. **Handbook of batteries**. [S.l: s.n.], 2004.

LOGENTHIRAN, T.; SRINIVASAN, Dipti; KHAMBADKONE, Ashwin M. Multi-agent system for energy resource scheduling of integrated microgrids in a distributed system. **Electric Power Systems Research**, 2011.

LOPES, João Abel Peças et al. Operation of multi-microgrids. **Microgrids Archit. Control**. [S.l: s.n.], 2013. .

LUQUE, Antonio; HEGEDUS, Steven. **Handb. Photovolt. Sci. Eng**. [S.l: s.n.], 2011.

MADUREIRA, André Guimarães. Coordinated and optimized voltage management of distribution networks with multi-microgrids. n. July, p. 234, 2010.

MAHMOUD, M. S.; AZHER HUSSAIN, S.; ABIDO, M. A. Modeling and control of microgrid: An overview. **Journal of the Franklin Institute**, v. 351, n. 5, p. 2822–2859, 2014.

MARNAY, Chris et al. Japan's pivot to resilience: How two microgrids fared after the 2011 earthquake. **IEEE Power and Energy Magazine**, 2015.

MARYAMA, Victor. Gerenciamento Energético para Microrredes Inteligentes. 2013.

MEDEIROS, J. A. C. C. **Enxame de partículas como ferramenta de otimização em problemas complexos de engenharia nuclear**. Tese de Do ed. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

NIST. **Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards**. Nist Special Publication. [S.l: s.n.], 2012.

OLIVARES, DE. A centralized energy management system for isolated microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 5, n. 4, p. 1864–1875, 2014. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6805674>.

OLIVEIRA, D. Q. et al. Microgrid management in emergency scenarios for smart electrical energy usage. 2015, [S.l: s.n.], 2015.

PELIELO, Gabriel; ACCÁCIO, Rafael; MOYSÉS, Rodrigo. **Smart Grid - Redes Inteligentes**. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2016-1/16_1/smartgrid/>. Acesso em: 21 out. 2018.

PEREIRA, Enio Bueno et al. **Brazilian Atlas of Solar Energy**. [S.l: s.n.], 2006. Disponível em: <http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf%5Cnhttp://sonda.ccst.inpe.br/publicacoes/atlas_solar.html>.

PEREIRA, Jose Claudio. **Grupos Geradores**. Disponível em: <http://www.joseclaudio.eng.br/grupos_geradores_5.html>. Acesso em: 20 out. 2018.

PICOLO, Ana Paula; ALEXANDRE, J B; RAMPINELLI, Giuliano Arns. Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica. v. 4306, 2014.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistema Fotovoltaicos**. 2. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2014.

PLANAS, Estefanía et al. AC and DC technology in microgrids: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 726–749, 2015.

RAHMAN, Saifur. Framework for a resilient and environment-friendly microgrid with demand-side participation. 2008, [S.l: s.n.], 2008.

RAO, V. Vasudeva. Superconducting Magnetic Energy Storage and Applications. 2008, [S.l: s.n.], 2008.

REN, Ye; SUGANTHAN, P. N.; SRIKANTH, N. **Ensemble methods for wind and solar power forecasting - A state-of-the-art review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. [S.l.: s.n.], 2015

RESENDE, F. O.; GIL, N. J.; LOPES, J. A. Peças. Service restoration on distribution systems using Multi-MicroGrids. *European Transactions on Electrical Power*, 2011.

RIBEIRO, Paulo F. et al. Energy Storage systems for Advances Power Applications. *Proceedings of the IEEE*, 2001.

RIVERA, Ricardo; ESPOSITO, Alexandre Siciliano; TEIXEIRA, Ingrid. Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local. *Revista do BNDES*, 2013.

SCHWEDE, Jared W. et al. Photon-enhanced thermionic emission for solar concentrator systems. *Nature Materials*, 2010.

SHI, Yuhui et al. Evolutionary Programming VII. *Lecture Notes in Computer Science: Evolutionary Programming VII*, 1998.

SIDNEY NASCIMENTO CERQUEIRA JUNIOR; OSVALDO RONALD SAAVEDRA MENDEZ. Despacho econômico e ambiental em microrredes usando algoritmo de busca direta. n. May, 2015. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/proceedings/paper/?P=SBSE2016-0424>>.

SOUZA, Ronilson LIVRO. Os sistemas de energia solar fotovoltaica - Livro digital de introdução aos sistemas solares. *Bluesol*, p. 114, 2016. Disponível em: <<http://programaintegradoronline.com.br/wp-content/uploads/2016/03/Livro-Digital-de-Introdução-aos-Sistemas-Solares-novo.pdf>>.

STEMAC. **O que são Grupos Geradores?** Disponível em: <<http://www.blogstemac.com.br/artigos-tecnicos/o-que-sao-grupos-geradores/>>. Acesso em: 19 out. 2018.

TON, D.; Smith M. The U.S. Department of Energy's Microgrid Initiative. *Electricity Journal*, v. 25, n. 8, p. 84–94, 2012.

TSIKALAKIS, Antonis G.; HATZIARGYRIOU, Nikos D. Operation of microgrids with demand side bidding and continuity of supply for critical loads. *European Transactions on Electrical Power*, 2011.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica - Introdução**. [S.l.: s.n.], 2016.

WANG, Zhaoyu; WANG, Jianhui. Self-Healing Resilient Distribution Systems Based on Sectionalization into Microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 30, n. 6, p. 3139–3149, 2015.

XU, Xufeng et al. Planning of reliable microgrids in the presence of random and catastrophic events. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2014.

ANEXO A – ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

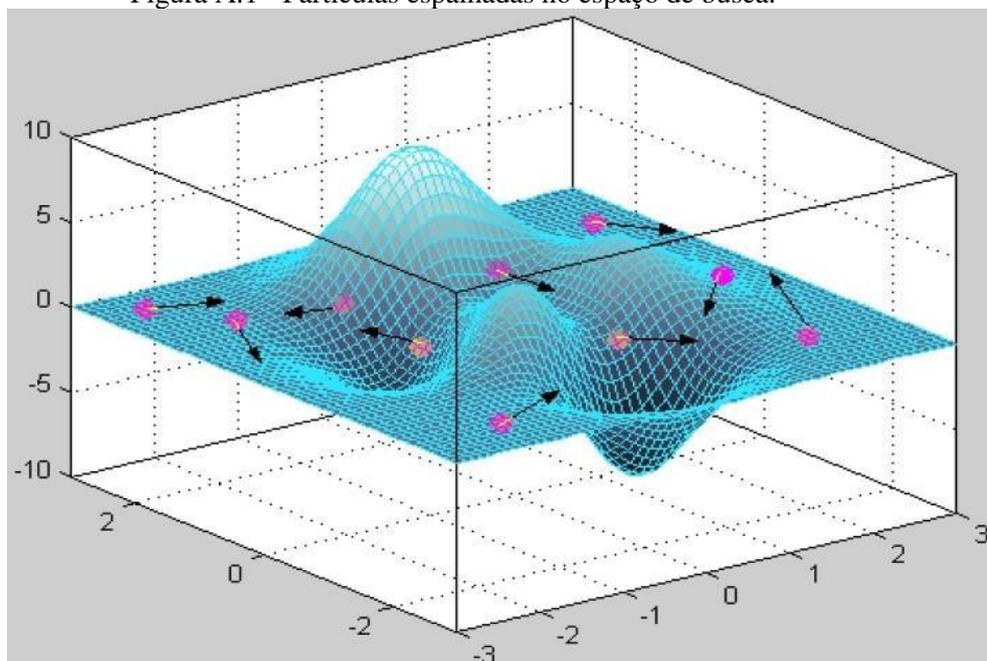
O algoritmo PSO possui um vetor de posições $X_d = [X_{d1}, X_{d2}, \dots, X_{dD}]$ e outro de velocidade $V_d = [V_{d1}, V_{d2}, \dots, V_{dD}]$, onde D é a dimensão do problema. Deste modo, uma partícula Q pode ser representada como:

$$Q = (X, V) \quad (\text{A.1})$$

Cada partícula “d” desse enxame é candidata à solução do problema. As partículas têm associadas um valor que é avaliado individualmente e que indica a adequação da partícula como solução do problema. Além disso, essas partículas têm também associadas uma velocidade que define a direção de seu movimento. Cada partícula modifica sua velocidade levando em conta a sua melhor posição (Pbest) e também a melhor posição do grupo (Gbest), fazendo-se com que este, ao longo do tempo, alcance seu objetivo.

As partículas são inicializadas aleatoriamente dentro do espaço de busca, conforme Figura A.1.

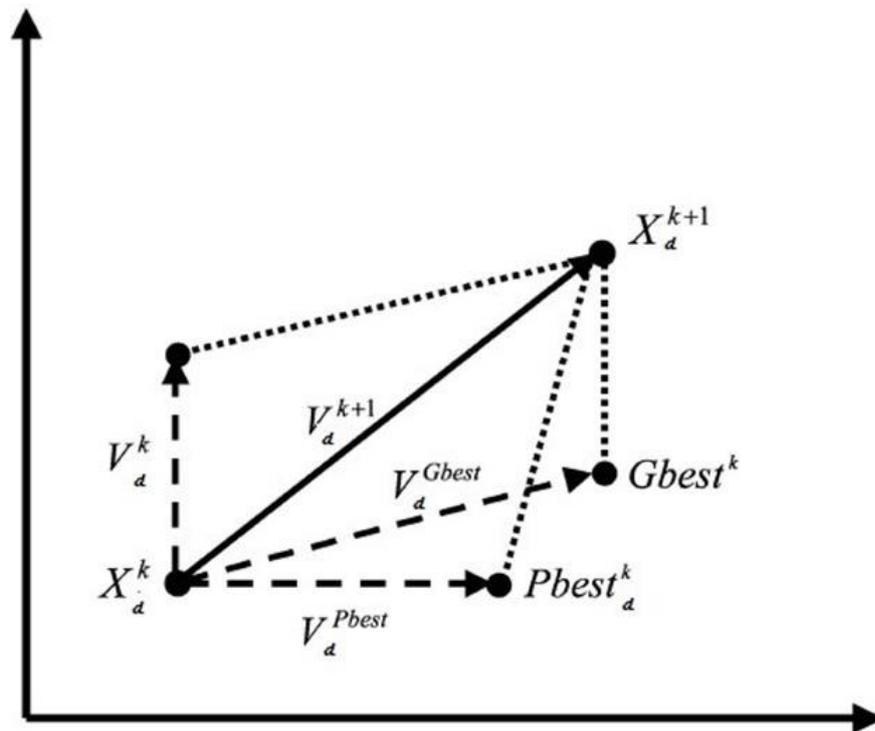
Figura A.1 - Partículas espalhadas no espaço de busca.



Fonte: MEDEIROS, (2005).

Logo após, dá-se início ao processo iterativo, onde as partículas irão atualizar suas posições e velocidades de acordo com as experiências adquiridas e guardadas em suas memórias, assim como o saber adquirido pelo enxame. O processo de busca e atualização da posição da partícula é mostrado na Figura A.2.

Figura A.2 - Processo de atualização da posição do algoritmo



A velocidade da partícula é dada na Equação 16.

$$V_d^k = w \cdot V_d^{k-1} + C_1 \cdot r_1 \cdot (Pbest_d^{k-1} - X_d^{k-1}) + C_2 \cdot r_2 \cdot (Gbest_d^{k-1} - X_d^{k-1}) \quad (A.2)$$

E a atualização da posição é dada por:

$$X_d^k = X_d^{k-1} + V_d^k \quad \text{para } d= 1, 2, \dots, N_{par} \quad (A.3)$$

onde:

X_d^k - Posição d na iteração k;

V_d^k - Velocidade da partícula d na iteração k;

w - Peso de inércia;
 $Pbest$ - Melhor posição da partícula;
 $Gbest$ - Melhor posição global no enxame;
 C_1, C_2 - Fatores de aprendizagem;
 r_1, r_2 - Números randômicos no intervalo $[0,1]$;
 N_{par} - Número de partículas.

Os parâmetros de confiança (C_1 e C_2) indicam o quanto as partículas confiam em si e no enxame. Estes são ajustados de acordo com o problema, pois são utilizados para a atualização do vetor velocidade. Valores para estes coeficientes muito utilizados na literatura são $C_1=C_2 = 2$, porém em outros trabalhos os melhores resultados foram encontrados utilizando 2,5 para ambos coeficientes.

O peso inercial w controla a exploração da partícula no espaço de busca. Shi e Eberhart (1998) foram os introdutores, onde propuseram uma variação do seu valor entre 0.9 e 0.4, no qual eles observaram que um valor muito grande aumenta a capacidade de exploração global das partículas e com um valor muito baixo facilita a exploração local. Assim, o ideal é valor de w seja alto no começo do processo iterativo, diminuindo ao final. A função que determina esse peso é dada por:

$$w = \frac{(w_{max} - w_{min}) \cdot iter}{iter_{max}} \quad (A.4)$$

sendo w_{max} e w_{min} respectivamente o peso inercial máximo e mínimo, $iter_{max}$ é o número de máximo de iterações e $iter$ é a iteração atual do algoritmo.

Por fim é definido o critério de parada, sendo o critério mais utilizado na literatura, dado pelo número de máximo de iterações.

Em resumo, o algoritmo pode ser descrito nos seguintes passos:

Algoritmo PSO básico

1. Inicializar a velocidade e posição de cada partícula da população aleatoriamente dentro do espaço de busca. Considerar população inicial como Pbest;
 2. Calcular o fitness de cada partícula. Se o valor encontrado é melhor que Pbest anterior, então Pbest será igual ao novo valor encontrado;
 3. Determinar a melhor posição entre todas as partículas, Gbest;
 4. Para cada partícula, calcular a velocidade usando a Equação 16;
 5. Atualizar a posição para cada partícula usando a Equação 17;
 6. Repetir passos 2-5 até que o critério de parada seja atendido;
 7. Fim.
-
-