

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

ADAN LUCIO PEREIRA

MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA RECONFIGURAÇÃO DE
REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

SÃO MATEUS
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

ADAN LUCIO PEREIRA

**MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA RECONFIGURAÇÃO DE
REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Energia na área de concentração Multidisciplinar em Engenharia, Tecnologia e Gestão.

Orientador:

Wanderley Cardoso Celeste.

Co-orientador:

Daniel José Custódio Coura

SÃO MATEUS

2016

Resumo

A introdução das Redes Elétricas Inteligentes está promovendo uma mudança de paradigma na forma de lidar com os sistemas de geração e distribuição de energia. Dessa forma, um dos problemas encontrados neste novo paradigma está em propor um método que permita a reconfiguração de uma rede elétrica no menor tempo possível sem atingir o funcionamento normal do sistema. Uma vez identificado o ponto na qual ocorreu alguma falha, deve-se isolar a zona onde ocorreu tal erro, através da abertura de dispositivos de seccionamento ou disjuntores, e proceder a manobras de outras chaves que permitam restabelecer o suprimento de energia às cargas. Inserindo-se nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o uso de um método heurístico baseado na metaheurística GRASP como solução para este problema, contribuindo para o desenvolvimento dessa nova área de pesquisa que em poucos anos já se mostrou bastante promissora.

Palavras-chave: Metaheurística, redes inteligentes, reconfiguração.

Sumário

Sumário.....	iii
Lista de Figuras.....	v
Lista de Tabelas	vii
Nomenclatura.....	viii
Capítulo 1: Introdução.....	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 O Problema de Reconfiguração de Redes Inteligentes de Energia.	3
1.3 Objetivos	5
1.4 Revisão Bibliográfica.....	6
1.5 Organização dos Capítulos	11
Capítulo 2: Microrredes e Redes Inteligentes de Energia	13
2.1 Microrredes	13
2.1.1 Características das Microrredes.....	15
2.1.2 Contingências em Microrredes.....	17
2.1.3 Regulação da Qualidade de Energia	19
2.1.4 Automação de Microrredes	22
2.2 Recursos de Geração Distribuída	24
2.2.1 Sistemas Fotovoltaicos	25
2.2.2 Centrais Geradoras Eólicas.....	30
2.2.3 Microturbinas a Gás	33
2.2.4 Hidroeletricidade.....	36
2.2.5 Células Combustíveis.....	40
2.2.6 Sistemas de Armazenamento	41
2.2.6.1 Sistemas de Armazenamento Baseado em Supercondutores Magnéticos.....	42
2.2.6.2 Sistemas de Armazenamento por Baterias (SAB).....	43
2.2.6.3 Sistemas de Capacitores Avançados (SCA).....	43
2.2.6.4 Sistemas <i>Flywheel</i>	44

2.3 Redes Inteligentes de Energia.....	45
2.3.1 Gestão pelo Lado da Demanda.....	50
2.3.2 Bases para Implementação das Redes Elétricas Inteligentes.	53
2.3.2.1 Infraestrutura de Medição.....	53
2.3.2.2 Inteligência em Sistemas de Energia.....	55
Capítulo 3: Métodos de Otimização.....	60
3.1 Heurísticas e Metaheurísticas	61
3.1.1 Busca Tabu.....	62
3.1.2 Colônia de Formigas.....	65
3.1.3 Algoritmo Genético.....	67
3.1.4 Busca de Vizinhança Variável.....	69
3.1.5 Metaheurística GRASP	72
3.1.6 Discussão dos Métodos Heurísticos Apresentados.....	73
Capítulo 4: Aspectos da Metodologia Proposta.....	77
4.1 Escopo de Aplicação do Problema	78
4.1.1 Utilização de Zonas de Proteção	80
4.2 Representação e Modelagem de Redes Inteligentes como Grafos.....	82
4.3 Procedimentos para Reconfigurações de REIs.....	86
4.4 Formulação do Problema de Reconfiguração de Redes Inteligentes de Energia.....	89
4.5 Desenvolvimento da Metaheurística GRASP	92
4.6 Ambiente de Implementação	97
4.7 Indicadores de Desempenho da Reconfiguração de Redes Inteligentes de Energia	98
Capítulo 5: Considerações Finais e Próximos Passos.....	100
Referências Bibliográficas.....	102

Lista de Figuras

Figura 1 - Rede baseada em uma microrrede.....	14
Figura 2 - Características das Microrredes.....	16
Figura 3 - Qualidade no fornecimento de energia.....	20
Figura 4 - Central Geradora Solar.....	26
Figura 5 - Esquema de um Sistema Diretamente Acoplado.....	27
Figura 6 - Sistema Fotovoltaico Independente com Armazenamento em Baterias.....	28
Figura 7 - Sistema Fotovoltaico Híbrido.....	29
Figura 8 - Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica.....	30
Figura 9 - Esquema de uma turbina upwind (a) e de uma turbina downwind (b).....	31
Figura 10 - Diagrama esquemático de uma HAWT.....	31
Figura 11 - Sistema de uma microturbina a gás com recuperador de calor.....	36
Figura 12 - Potencial de hidroeletricidade global.....	37
Figura 13 - Esquema de uma usina hidrelétrica mostrando seus componentes.....	38
Figura 14 - Diagrama de blocos da célula combustível.....	41
Figura 15 - Sistema de armazenamento de energia do tipo <i>flywheel</i>	45
Figura 16 - Aplicações e pesquisas das redes inteligentes de energia.....	48
Figura 17 - Técnicas de gerenciamento de carga.....	51
Figura 18 - Sistema de Medição Inteligente.....	54
Figura 19 - Caminhos da Colônia de Formigas.....	66
Figura 20 - Estados da topologia de um Sistema Elétrico de Potência.....	79
Figura 21 - Separação de um sistema elétrico por zonas de proteção.....	81
Figura 22 - Superposição de zonas de proteção.....	82
Figura 23 - Representação de um Grafo em Matriz de Adjacência.....	83
Figura 24 - Diagrama unifilar de representação de uma microrrede.....	84
Figura 25 - Representação de uma microrrede como um grafo.....	85

Figura 26 - Fluxograma do Sistema de Reconfiguração de REIs.....	88
Figura 27 - Fluxograma da Metaheurística Grasp.....	97

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Níveis de Inteligência	(Continua).....	55
Tabela 2 - Componentes de uma REI modelados em um grafo.....		85
Tabela 3 - Zonas de Proteção apresentadas na Microrrede.....		86

Nomenclatura

Símbolos métricos

Símbolo	Descrição	Unidade do SI
C_i	Capacidade de Geração Instalada	W
C_n	Carga Atendida em Estado Normal	W
C_R	Carga Atendida após Reconfiguração	W

Outras Unidades

Unidade	Descrição	Nome
Hz	Frequência ou velocidade angular	Hertz
W	Potência	Watt
MW	Múltiplo de unidade de potência	Megawatt
kWh	Múltiplo de unidade de energia	Quilowatt-hora
kW	Múltiplo de unidade de potência	Quilowatt
Var	Potência reativa	Volt-Ampère Reativo

Outros símbolos

Símbolo	Descrição	Ex.
P_{riposc}	Cargas com maior prioridade atendidas após uma contingência	-
P_{riprec}	Cargas com maior prioridade atendidas no início do processo	-
I_{ch_posc}	Índice do Número de Disjuntores ativos Após a Contingência	-
I_{ch_prec}	Índice do Número de Disjuntores ativos Após a Contingência	-
I_{CA}	Índice de Carga Atendida	-
I_{pri}	Indicador de Qualidades	-

Siglas

Símbolo	Descrição
ABB	<i>Asea Brown Boveri</i>
AC	<i>Alternated Current</i>
AG	Algoritmo Genético
AMI	<i>Automated Metering Infrastructure</i>
AMR	<i>Automated Meter Reading</i>
ACO	<i>Ant Colony Optimization</i>
BT	<i>Busca Tabu</i>
AHC	Algoritmo Heurístico Construtivo
FIFO	<i>First In First Out</i>
RCL	<i>Restricted Candidate List</i>
TC	Transformador de Corrente

Siglas (continuação)

Símbolo	Descrição
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
APTEL	<i>Associação de Empresas Proprietárias de Infraestrutura e de Sistemas Privados de Telecomunicações</i>
CC	Corrente Contínua
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
DFR	<i>Digital Fault Recorde</i>
DJ	Disjuntor
DMS	<i>Distribution Management Systems</i>
DNP	<i>Distributed Network Protocol</i>
DOE	<i>U.S. Department of Energy</i>
DR	<i>Demand response</i>
EEl	<i>Edson Electric Institute</i>
EMS	<i>Energy Management System</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FACTS	<i>Flexible AC transmission system</i>
GD	Geração distribuída
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HAN	<i>Home area network</i>
HANT	<i>Horizontal Axis Wind Turbine</i>
HTML	<i>hypertext mark-up language</i>
IA	Inteligência Artificial

IC	Inteligência Computacional
ICCP	<i>InterControl Center Communications Protocol</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IED	<i>Intelligent electronic device</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IPV6	Internet Protocol version 6
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
OIEE	Oferta Interna de Energia Elétrica
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
P&D	Pesquisa e desenvolvimento
PCC	Ponto Comum de Acoplamento
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PDRI	Programa Brasileiro de Redes Elétricas Inteligentes
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PROINFA	Fontes Alternativas de Energia Elétrica
REI	Redes Elétricas Inteligentes
SIN	Sistema Interligado Nacional
TI	Tecnologia de Informação
TIC	Tecnologias da Informação e Comunicação
UHE	Usina Hidrelétrica de Energia

Siglas (continuação)

Símbolo	Descrição
SAS	<i>Substation Automation Systems</i>
SC	Relé de sobrecorrente
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SPR	<i>Scaling Push Relabel</i>
SPS	<i>Ship Power System</i>
SUS	<i>Stochastic Universal Sampling</i>
T&D	Redes de Transmissão e Distribuição
TASE.2	<i>Telecontrol Application Service Element</i>
TC	Transformadores de Corrente
TIE	Disjuntor de interligação entre duas zonas de uma rede de energia
WAMS	<i>Wide Area Measurement System</i>

Capítulo 1: Introdução

1.1 Considerações Iniciais

Nos últimos anos o consumo da energia elétrica no Brasil cresceu de uma forma significativa. Em 2014, a Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) chegou a 624,3 TWh, montante 2,1% superior ao de 2013 (611,2 TWh), destaque os aumentos de 85,6% na oferta por geração eólica, de 43,4% por óleo, e de 30,9% por biomassa e outras renováveis (MME, 2015).

De acordo com as projeções para o ano de 2016, espera-se, em relação a 2015, um crescimento de 0,5% no consumo total de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN), explicado pelas taxas de variação das classes residencial (2,4%), industrial (-2,4%), comercial (2,4%) e outros (1,7%). No período entre 2016-2020, está previsto, que a taxa média de crescimento alcançará 4,3% (EPE e ONS, 2015).

Além dessa crescente demanda de energia, o fato de os combustíveis fósseis serem recursos limitados, aliado ao impacto ambiental que proporcionam, fez com que vários países explorassem fontes alternativas de energia, promovendo mudanças significativas na estrutura do sistema elétrico. A eletricidade gerada por meio da ação do vento, dos raios do sol, de fontes geotérmicas e hídricas e da biomassa são exemplos de fontes alternativas, também, por vezes, denominada energia “verde” ou de fontes renováveis (GOLDEMBERG, 2004; ALVIM, 2009; FRAGOMENI e GOELLNER, 2010; CARVALHO e SAUER, 2013; PINTO, 2014).

Em âmbito nacional, outras mudanças começaram a aparecer após a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), instituído com o objetivo de promover a diversificação da matriz energética brasileira (BRASIL, 2002). Adicionalmente, a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, da Agência

Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), estabeleceu as condições gerais para o acesso dessas novas fontes aos sistemas de energia elétrica (ANEEL, 2012).

Com a utilização dessas fontes de energia, renováveis ou não, nasceu o termo Geração Distribuída (GD) que tem sido muito discutido no meio acadêmico e no setor elétrico, uma vez que permite a construção de pequenas fontes de geração de energia, as Microfontes (MF), independente da carga, o mais próximo possível do consumidor final, evitando assim, todos os custos e impactos inerentes à geração centralizada (INEE, 2013; DAL TOÉ e RIDER, 2014).

A utilização do conceito de geração distribuída, em conjunto, com as microfontes pode ser denominada de Microrredes (MR). Nessas, os diversos geradores, cargas e dispositivos de armazenamento estão agrupados, o que os torna semelhantes a um único e controlável ativo para o Sistema Elétrico de Potência (SEP). Isto simplifica o processo de integração do grande número de dispositivos de energia renovável (MOREIRA *et al*, 2007; SOUZA, 2009; PEREIRA *et al*, 2015).

Com essa crescente integração das instalações de geração de energia renovável, a energia pode fluir, não somente, das estações centrais em direção aos consumidores, mas também, do cliente para a rede elétrica. Esse fluxo invertido leva a uma estrutura mais complexa de rede, pois, muitos recursos renováveis demonstram uma natureza intermitente e imprevisível no fornecimento de energia (CHAVES e LEÃO; VANDERLINDE *et al*, 2014).

Impulsionado por esses desafios, o conceito das Redes Elétricas Inteligentes (REI), do inglês *Smart Grids*, nasceu para definir a evolução dessas redes combinando a infraestrutura de energia elétrica com as modernas instalações de computação distribuída e redes de comunicação. Trata-se de uma coleção de sistemas interdependentes e complexos cujas principais funções incluem, a entrega eficiente e confiável de energia elétrica, o corte de energia de pico e a integração dos recursos de energia renovável (RIVERA *et al*, 2013; POSSAGNOLO *et al*, 2014; BERGER e INIEWSKI, 2015).

Atrelados a esse novo paradigma de geração e consumo de energia, a introdução das redes elétricas inteligentes apresenta uma mudança na forma de lidar como os sistemas de distribuição, o que representa um salto gigantesco e, ao mesmo tempo, um imenso desafio.

1.2 O Problema de Reconfiguração de Redes Inteligentes de Energia.

Tradicionalmente, o conceito das redes elétricas inteligentes, do inglês *Smart Grids*, refere-se ao estudo da automação integrada e segura das redes elétricas, dos sistemas de medição, de geração e do armazenamento distribuído de energia, de modo a permitir que a rede elétrica, por meio de análises e diagnósticos em tempo real, se reconfigure automaticamente para atender, de forma otimizada, às suas necessidades (LIGHT S. A, 2010; DEPURU *et al*, 2011; BANDEIRA, 2012; MORAIS *et al*, 2014).

Assim, as redes inteligentes consistem em uma ou mais microrredes que interagem entre si e com o sistema de energia de maior porte, o SEP. Microrredes, por sua vez, são redes de energia elétrica com diversas unidades consumidoras (cargas) e diversos geradores de baixa potência estrategicamente distribuídos. Ambos, cargas e geradores, são localizados geograficamente próximos (TOLEDO, 2012; MCTI, 2015).

Em situações de contingência, provocadas por intempéries eletromagnéticas e/ou climáticas, em um ponto específico da microrrede, torna-se necessário identificar a condição anormal e isolar todas as fontes de energia e cargas adjacentes, com o objetivo de evitar que o problema se propague. Entretanto, o restante do sistema de distribuição, não afetado pela falha, deve continuar funcionando em estado normal (RAHMANI *et al*, 2013; MOREIRA *et al*, 2014).

Os sistemas de distribuição, em especial os sistemas aéreos, são, na grande maioria, configurados radialmente. Esses sistemas apresentam possibilidades de alteração da

topologia, através da abertura/fechamento de chaves seccionadoras localizadas em pontos estratégicos. A alteração da topologia, mantendo-se a radialidade, é realizada de modo a reduzir as perdas ativas nos alimentadores, melhorar o perfil de tensão para os consumidores, aumentar os níveis de confiabilidade e eliminar e/ou isolar faltas restaurando o fornecimento de energia (GARCIA, 2005; MOREIRA *et al*, 2014).

Assim, estas chaves seccionadoras são utilizadas para ambos os objetivos: proteção (isolamento, em situação de contingência) e reconfiguração (gerenciamento da configuração). Nesse contexto, um dos problemas que exige a utilização de ferramentas computacionais eficientes, de execução rápida, é o de reconfiguração das redes de energia após a ocorrência de faltas permanentes (MARQUES, 2013; CARRANO *et al*, 2014).

Adicionalmente existem, nas redes elétricas, cargas que necessitam ter prioridade de fornecimento no procedimento de reconfiguração de energia após uma contingência. Conseqüentemente, o fornecimento a essas cargas não deve ser interrompido, e, caso haja alguma atingida, esta deve ser restabelecida o quanto antes. Essas cargas prioritárias representam os consumidores especiais, tais como: hospitais, centros de transfusão de sangue, indústrias e supermercados de grande porte (MARQUES *et al*, 2013; PEREIRA *et al*, 2014).

Assim, essa nova configuração deve ser capaz de atender de forma aceitável o maior número de consumidores e/ou as cargas de maior prioridade, reestabelecendo o funcionamento do sistema. Para isso, os requisitos e restrições, físicas e operacionais, devem ser atendidos de forma que a nova configuração possa ser implementada com segurança (BANDEIRA, 2012; CAVALCANTE *et al*, 2013).

O problema de reconfiguração de redes elétricas inteligentes é modelado como um problema de programação não linear inteiro misto, pode ter enfoque multi-objetivo, sujeito às restrições operacionais e de cargas. Sendo um problema de natureza combinatória, a busca por soluções factíveis e de qualidade torna-se extremamente complexa devido à dimensão do espaço de busca e a alta quantidade de soluções infactíveis, que não atendem

ao modelo matemático do problema (SALAZAR, 2006; OLIVEIRA, 2009; FRANCO *et al*, 2012; PÁDUA, 2013; PEREIRA *et al*, 2014; SOUZA e ROMERO, 2015; CAMILLO *et al*, 2016).

A dimensão do espaço de busca do problema está intimamente relacionada com número de disjuntores envolvidos na busca de uma configuração ótima. Quanto maior o número de disjuntores, mais complexa e difícil é a solução do problema (ROSSETI *et al*, 2015). Portanto, uma solução viável, consiste em encontrar um conjunto de configurações radiais que apresente o menor custo de perdas resistivas, o menor custo de confiabilidade e o menor número de manobras, respeitando sempre as restrições de níveis de tensão, capacidade de fluxo nas linhas e a potência nominal dos geradores envolvidos.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é propor uma metodologia para a resolução do problema de reconfiguração de redes inteligentes de energia, que permita:

- Minimizar o número de cargas não religadas;
- Minimizar o número de operações de chaveamento;
- Maximizar a potência consumida.

Como objetivos específicos tem-se:

- Revisar a literatura sobre microrredes e REIs;
- Definir os recursos utilizados na geração distribuída;
- Estabelecer, dentro do conceito de REIs, o estado atual de implantação da automação no segmento de distribuição de energia elétrica;
- Analisar alguns dos modelos existentes e metodologias de solução aplicadas ao problema;
- Apresentar uma formulação diferenciada do problema de reconfiguração de REIs;

- Utilizar fatores de ponderação para converter um problema multi-objetivo em um mono-objetivo;
- Utilizar técnicas de otimização para rejeição de cargas;
- Utilizar a teoria dos grafos para modelagem computacional;
- Propor contribuições e discutir perspectivas futuras para os esforços em pesquisa, desenvolvimento em REIs.

1.4 Revisão Bibliográfica

A partir do início da última década, o conceito das REIs começou a ser editado e, desde então tornou-se um dos temas mais discutidos no setor elétrico mundial. Por se tratar de um conjunto de produtos e definições de diversas áreas, sua motivação, interpretação, abrangência e desafios são diferenciados entre os países de concessão e/ou áreas de pesquisa (NIST, 2010; BOTEVA *et al*, 2012; KAGAN *et al*, 2013; SILVA *et al*, 2014; MCTI, 2015).

No Brasil, incentivada pela Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (ABRADEE) da Energia e pela Associação de Empresas Proprietárias de Infraestrutura e de Sistemas Privados de Telecomunicações (APTEL) e, reconhecendo uma tendência de mudanças radicais de substituição da infraestrutura atual do sistema de distribuição de energia elétrica em direção às redes elétricas inteligentes, a ANEEL, por meio da Chamada Pública nº 011/2010, solicitou o desenvolvimento do Projeto Estratégico de P&D: Programa Brasileiro de Redes Elétricas Inteligentes (PDRI) (ANEEL, 2010).

O estudo desenvolvido no PDRI analisou a relação benefício custo da adoção do conceito de redes elétricas inteligentes em três cenários inserção da população: Conservador, com 52% das unidades consumidoras atendidas por redes inteligentes no final do período de análise em 2030; Moderado, com 61%; e Acelerado, com 75%. Além

do nível de inserção o estudo levou em consideração a utilização da geração distribuída de novas fontes de energia. Quanto ao armazenamento de energia, foram consideradas projeções para bateria íon-lítio, sistemas *flywheel*, capacitores avançados e o armazenamento em supercondutores magnéticos. O Projeto é abordado em 7 Blocos de Pesquisa: Governança e Integração; Medição; Automação; Geração e Armazenamento Distribuídos e Veículos Elétricos; Telecomunicações, Tecnologia da informação e Interoperabilidade; Políticas Públicas e Regulação; Perspectiva do Consumidor (PDRI, 2015).

O Programa *Smart Grid Light*, que está sendo implantando na Cidade do Rio de Janeiro – Brasil, apresenta uma série de estudos dedicados à organização e desenvolvimento de um sistema de gestão de redes de distribuição. Para isso foi determinado cinco níveis de organização do sistema com o objetivo de monitorar, diagnosticar e reconfigurar as redes caso falhas ocorram. Esses níveis incluem a implantação de medidores inteligentes para 400.000 consumidores, com a opção de corte/religa integrado, primordial para rejeição de cargas do sistema e/ou cobranças; sistemas de armazenamento; integração de sistema comercial (leitura/faturamento); e sistemas de apoio operacional (PDRI, 2015).

Em paralelo, no Brasil existem outros projetos de cidades inteligentes que permitem o desenvolvimento técnico de questões importantes como a infraestrutura de medição, gestão da demanda de energia elétrica e o tratamento de detecção de falhas, isolamento e restauração de cargas. É possível encontrar o desenvolvimento de outras cidades inteligentes nas cidades de Barueri - SP, Aparecida - SP, Parintins - AM, Curitiba - PR, Arquipélago de Fernando de Noronha - PE, Armação de Búzios - RJ e Sete Lagoas - MG. O projeto em Sete lagoas está em processo de desenvolvimento e irá contar com 30 pontos de reconfiguração e/ou isolamento de cargas e/ou geradores de redes de energia (CEMIG, 2015).

Com o objetivo de planejar e reconfigurar redes de energia, vários autores encontrados na literatura utilizaram a teoria dos grafos como forma de representação dos sistemas de distribuição. (AUGUGLIARO *et al*, 2000; Mao e Mil, 2003; DELBEM *et al*, 2005; FRANCO *et al*, 2012; SANCHES *et al*, 2015; CAMILLO *et al*, 2016).

O estudo realizado por Mao e Mil (2003) mostra um método baseado em grafos para planejar a localização de chaves (disjuntores) em sistemas de distribuição de energia elétrica radial com GD. A metodologia proposta pode definir novas chaves, e operar chaves existentes para definir a área de serviço da geração distribuída de energia o que permite aumentar a eficiência do sistema.

Os métodos heurísticos buscam soluções de boa qualidade, dado o tempo computacional disponível. No escopo do problema de reconfiguração de REI, as heurísticas possuem princípios baseados no chaveamento para a confecção de soluções factíveis (ROMANO *et al*, 2013). Assim, Gomes *et al* (2006) propuseram uma heurística do tipo abertura sequencial de chaves, onde, todas as chaves iniciam fechadas e, a cada iteração, abre-se uma chave até a rede se tornar radial. Já a heurística construtiva proposta por Lopez *et al* (2002), consiste no processo inverso, ou seja, a rede inicial é obtida pela desconexão de todas as chaves. Em seguida, a cada iteração, as cargas são conectadas e as chaves fechadas até uma configuração radial ser encontrada.

A utilização da permutação de ramos de um grafo, é encontrada em alguns trabalhos (SCHMIDT *et al*, 2005; DAS, 2006; ABABEI e KAVASSERI, 2011), o espaço de busca dessa heurística inicia-se com uma rede radial, e a cada iteração um par de chaves aberta/fechada é escolhido. Ao fim das iterações, a rede continua factível e com menor valor de função objetivo.

Um método heurístico para reconfiguração e restauração de suprimento de energia em situações de contingência, é apresentado por Luan *et al* (2002). Esse método indica estratégias para rejeição de cargas aplicadas em redes de distribuição de energia. Foi

utilizada a teoria de grafos para modelar o sistema elétrico, onde, o estado dos disjuntores determina a ligação entre os vértices do grafo.

ZVIETCOVICH (2006) apresenta uma técnica de Busca em Vizinhança Variável, que utiliza critérios heurísticos de busca em vizinhança para reduzir perdas através da reconfiguração. Nesse trabalho são utilizados duas heurísticas, *Variable Neighborhood Search* (VNS) e *Variable Neighborhood Descendent* (VND). A metodologia inicia o processo de busca a partir de uma solução radial e através da abertura /fechamento de chaves percorre-se a vizinhança das soluções.

Uma formulação do problema analisando a alocação e realocação de chaves seccionadoras para restauração de redes de distribuição sob a ação de contingências é exposto no trabalho de Silva *et al* (2004). Esse modelo apresenta o problema como um problema de programação não linear inteiro misto, onde a função objetivo considera os dados históricos das interrupções de fornecimento de energia, a quantidade e a localização das chaves seccionadoras; tempos de reparo que cada consumidor sofre, no ponto, a jusante e a montante da área atingida.

Romero *et al* (2005) apresentaram uma metodologia capaz de formular algebricamente as restrições elétricas e de radialidade de um sistema elétrico de distribuição. Esse trabalho apresenta duas metodologias de solução: a primeira abordagem, tal problema é tratado como um problema convencional de programação linear inteira mista, e a segunda utilizaram um procedimento heurístico baseado em algoritmos genéticos.

O modelo proposto por SEDANO *et al* (2005), procura minimizar a quantidade de cargas que ficariam desenergizadas no caso de uma falta permanente na rede. Esse estudo utiliza como técnica de solução para determinar a topologia da rede após o estado restaurativo a heurística Busca Tabu (BT). Para isso, cada possível solução é avaliada através de uma função de adaptação que considera a função objetivo mais a penalização das restrições violadas. As restrições são analisadas tendo como base os resultados de um

fluxo de potência monofásico para redes radiais. Para avaliar a metodologia proposta foram realizados testes em um sistema de distribuição de 54 barras.

Mathias Neto *et al* (2010) apresentaram um algoritmo para a restauração de redes de distribuição de energia elétrica baseado na meta-heurística *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP). O objetivo desse estudo buscou minimizar o número de consumidores sem fornecimento de energia. Os resultados mostraram que a técnica se ajustou bem ao problema e conseguiu, em um tempo considerado adequado, soluções factíveis do ponto de vista matemático, pois, atendeu todas as restrições e do ponto de vista operacional devido ao pequeno número de chaves manobradas.

Uma heurística baseada na permuta de ramos e no método *branch-and-bound* é apresentada por Guedes *et al* (2012). A heurística desenvolvida baseia-se nos métodos de enumeração, largamente aplicados em problemas discretos. O espaço de busca do problema de reconfiguração aumenta exponencialmente, o que inviabiliza uma enumeração completa. Assim, a estratégia *branch-and-bound* constrói uma árvore de busca, baseada nos agrupamentos formados por um nó e seus ramos. O nó representa uma solução para o problema e dele pode-se construir outras soluções, as ramificações. Esse método, no trabalho, é comparado com uma versão multi-objetivo da metaheurística GRASP. Os resultados demonstram a capacidade do GRASP e da heurística de mapear as soluções de forma diversificada e de boa qualidade. A heurística, por sua característica descendente e sua dependência de uma solução inicial, em algumas situações não se mostrou tão eficiente quanto a GRASP. Entretanto, esse método realiza apenas fluxos de potência em redes radiais, enquanto que a primeira fase do GRASP executa fluxo de potência em redes não radiais, cuja complexidade é maior. Dessa forma a heurística retornou suas soluções com menor tempo de execução.

Em Pham *et al* (2009), insere-se no contexto das REIs, com o objetivo de explorar a presença dos geradores, geração distribuída, como suporte adicional em casos de interrupções mais críticas e, assim, acelerar o processo de restauração e aumentar o

número de cargas ativas no sistema. A metodologia propõe a ocorrência de um grande número de ilhamentos das microrredes, permitindo paralelamente a restauração de muitas áreas em diferentes condições de carregamento. Esse estudo utiliza uma adaptação do algoritmo *branch and bound* e as propostas apresentadas são validadas por meio do cálculo de fluxo de carga, que determina a situação final do sistema.

Em 2013, Bento propôs uma metodologia de reconfiguração de REI baseada na evolução darwiniana, com a utilização de um algoritmo evolutivo (DEB, 2001), o Algoritmo Genético (AG). Para tal aplicação ele utiliza grafos para representar as redes, esquema de divisão de zonas de proteção e o algoritmo genético para reconfiguração da rede priorizando o balanço entre a capacidade de geração e demanda das cargas. A metodologia proposta foi aplicada em duas microrredes bem definidas na literatura. Adicionalmente, esse trabalho formula os denominados indicadores de desempenho da reconfiguração de REI, permitindo uma análise quantitativa e objetiva de distintas soluções aplicadas ao problema de reconfiguração.

No trabalho de Camillo *et al* (2016), é apresentada uma metodologia que permite a obtenção de planos de restabelecimento de energia em sistemas de distribuição de grande porte. Essa metodologia utiliza o conceito de Nó-Profundidade (DELBEM *et al*, 2004) para representar computacionalmente a topologia elétrica, assim, para a profundidade de um nó dentro de um grafo, considera-se a distância dada pelo número de nós existentes entre o mesmo e o nó raiz. O trabalho considera que a duração da interrupção é caracterizada como momentânea, quando, o intervalo de interrupção do serviço é inferior a 3 min.

1.5 Organização dos Capítulos

O trabalho está organizado em 6 capítulos, sendo que neste primeiro capítulo foi apresentada a introdução e motivação para realização do trabalho, bem como uma breve

definição do problema de reconfiguração das redes de energia elétrica e uma revisão da literatura existente sobre este tema.

No segundo capítulo são abordados os conceitos de microrredes envolvendo os modos de operação e os recursos para geração distribuída, redes inteligentes e sua forma de representação como grafos e posteriormente é apresentada a restrição de tempo exigida nos sistemas de reconfiguração de energia.

No terceiro capítulo são descritos os métodos heurísticos encontrados na revisão bibliográfica deste trabalho, assim são relacionados os conceitos do uso da inteligência artificial para representação de uma rede de energia elétrica e os tipos de metaheurísticas encontradas na literatura.

No quarto capítulo são apresentados os aspectos da metodologia proposta, detalhando as questões da metaheurística GRASP, como cada um dos componentes de uma microrrede pode se comportar diante da reconfiguração e os procedimentos para a realização deste trabalho.

No quinto capítulo estão dispostas as considerações finais deste trabalho..

Capítulo 2: Microrredes e Redes Inteligentes de Energia

2.1 Microrredes

As redes de energia elétrica atuais têm se baseado em uma topologia radial, onde o gerador é conectado a muitos consumidores em uma estrutura parecida com uma árvore, apresentando geradores com alta capacidade de geração situados em regiões distantes dos centros de consumo e fornecendo fluxo de potência unidirecional (SIOHANSI, 2012; BENTO, 2013). Assim, essas redes transmissão de energia de grande porte transportam eletricidade por longas distâncias, dos geradores às cargas. Mais próximo às cargas, as redes de distribuição, desempenham o papel de conectar as cargas às redes de transmissão de longa distância (TOLEDO *et al*, 2012).

Esses sistemas de energia são projetados de tal forma que o pico de carregamento de energia, ou seja, a carga máxima suportada pelo sistema em um determinado horário, possa ser atendido por fontes já existentes. Contudo, com o crescimento da demanda, o atendimento a esses picos tem levado os sistemas aos seus limites operacionais, aumentando sua vulnerabilidade quanto à estabilidade no fornecimento de energia (MARINHO, 2011).

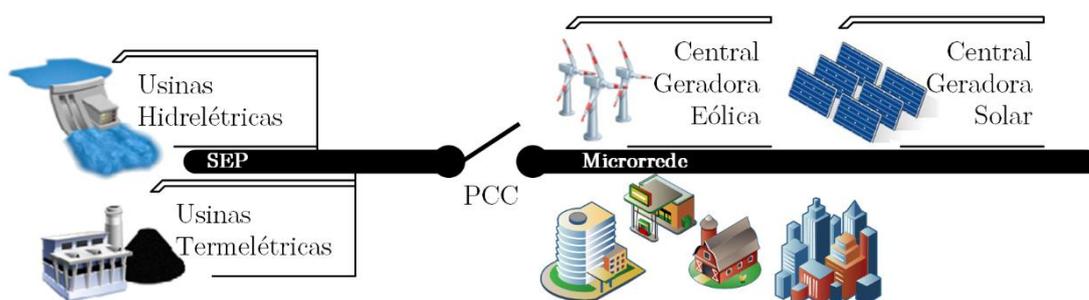
Para atender a esse aumento de demanda cada vez mais expressivo, as redes de energia elétrica tradicionais têm sido gradualmente modificadas pela instalação de diversos geradores de pequena escala próximos aos consumidores. Consequentemente, os conceitos de Microrrede (MR) e Geração Distribuída (GD) voltaram a atrair a atenção de pesquisadores, operadores de redes elétricas e da indústria, para obtenção de eletricidade de forma autônoma, com baixa emissão de poluentes e ainda compatível com

a rede elétrica tradicional (TURKSON e WOHLGEMUTH, 2001; LASSETER; ZILLES *et al*, 2002; DA SILVA, 2011; MIRANDA, 2013; MCTI, 2015).

O princípio básico da GD consiste em acrescentar geração de pequeno ou médio porte, a partir da utilização de fontes alternativas de energia, baseada em diferentes tecnologias, em sistemas de distribuição e subtransmissão. O uso de GD oferece inúmeras vantagens, uma vez que, a disposição da unidade de geração próxima à carga permite a redução das perdas associadas ao transporte de energia elétrica (TOLEDO *et al*, 2012; INNE, 2013).

Em paralelo, uma MR é basicamente um agrupamento de unidades de GD e cargas que estão conectadas à rede elétrica principal em um único ponto o, *Point of Common Coupling* (PCC), através de uma chave. O PCC permite a interação da microrrede com o Sistema Elétrico de Potência (SEP), facilitando a importação/exportação de energia quando necessário (AZEVEDO, 2012). A Figura 1 mostra uma microrrede alimentada por duas fontes de geração, uma central geradora solar e outra eólica, conectada ao SEP pelo PCC.

Figura 1 - Rede baseada em uma microrrede



Fonte: Elaboração Própria.

Assim, o conceito de MR utiliza da geração distribuída para suprir cargas localmente, adaptando a geração às necessidades da carga. Uma microrrede é formada por uma região geoeletrica com suprimento de diversas fontes podendo ser renováveis, não renováveis, tradicionais ou alternativas. Elas podem ser de natureza elétrica,

mecânica, térmica ou, ainda, química. A interconexão dessas fontes com o barramento de baixa tensão da MR, em sua maioria, é possível por meio do uso da eletrônica de potência que garante a confiabilidade, o controle e a flexibilidade exigida pela MR (CHOWDHURY *et al*, 2009; TOLEDO *et al*, 2012; BERGER e INIEWSKI, 2015).

As microrredes podem suprir os custos ambientais da geração de energia com eficiência, atendendo aos exigentes requisitos de segurança, qualidade, confiabilidade e disponibilidade (SQRA – *Security, Quality, Reliability and Availability*) (MARNAY, 2007). Adicionalmente, um dos fatores que determina o sucesso de sua implementação consiste em determinar o nível de prioridade das cargas conectadas. Dessa forma, uma carga com maior prioridade deve, necessariamente, dispor de um suprimento de grande confiabilidade e com qualidade garantida (MARINHO, 2011; JIMENEZ e HATZIARGYRIOU, 2006).

2.1.1 Características das Microrredes

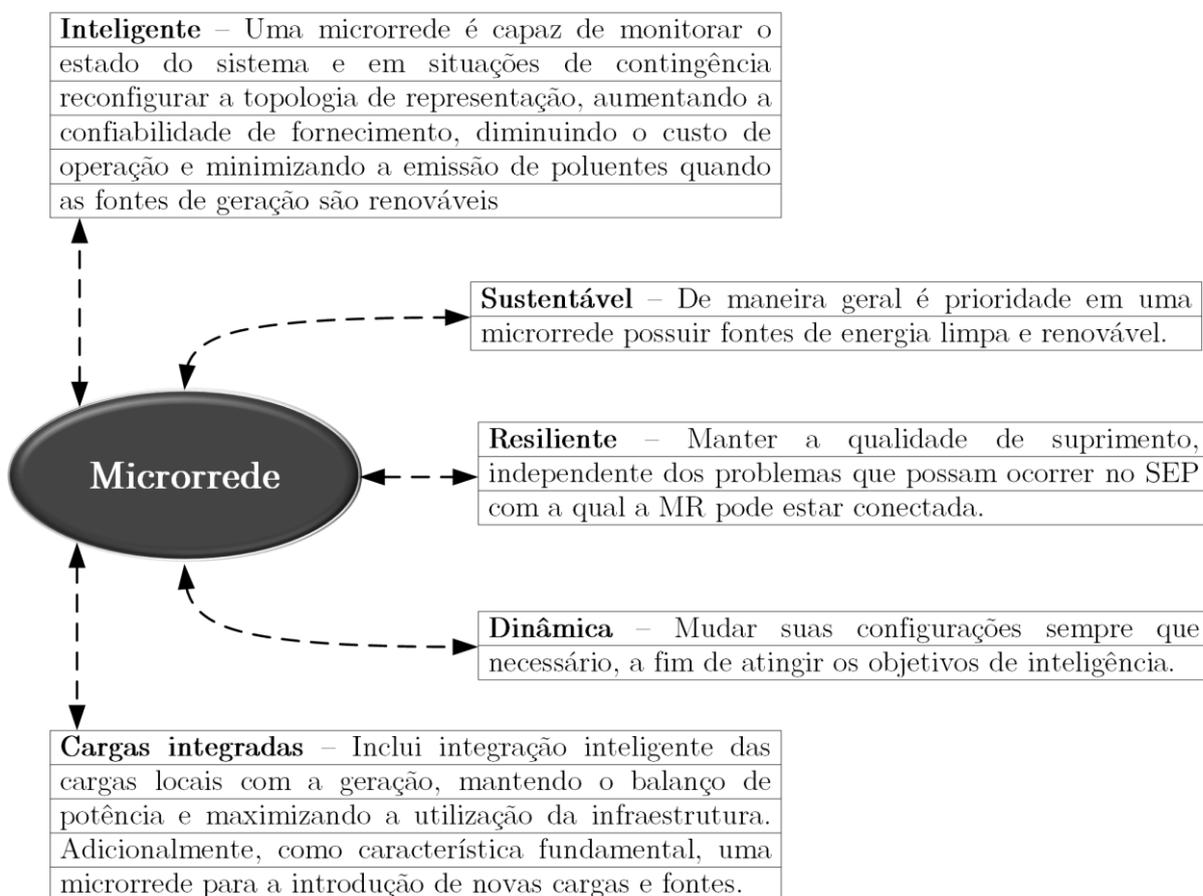
Além de atenuar o carregamento das linhas de transmissão, com a instalação da geração de energia próxima às cargas (reduzindo os fluxos e os circuitos de distribuição), o uso das microrredes, também pode minimizar o impacto de possíveis contingências. Assim, a característica de maior importância das MRs é que, ainda que estejam inicialmente conectadas ao sistema elétrico principal, formado por grandes usinas geradoras, elas podem ser rapidamente isoladas, funcionando no modo ilhado, ou seja, desconectadas do sistema principal, em caso de avarias na rede a montante ou mesmo de opção operacional (MARINHO, 2011; MIRANDA, 2013).

Quando em modo de ilhamento, a MR se desconecta do SEP e trabalha de forma autônoma, mantendo sua demanda de energia abastecida pelo próprio sistema de geração da microrrede. Já no modo conectado, a MR permanece ligada ao barramento de baixa tensão do SEP, e atua como um subsistema da rede de distribuição. Nesse modo, cargas internas à MR são supridas por suas diversas microfuentes (BANDEIRA, 2012).

Durante anos, o estudo de operação de uma MR não era bem visto por grande maioria das concessionárias. Contudo, com o advento das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) e das redes inteligentes (*SmartGrids*), muitas concessionárias de energia têm se mostrado favoráveis a implantações de projetos-pilotos para a operação em modo ilhado (ilhamento intencional) ou até mesmo MR dentro de suas áreas de concessão. Os primeiros resultados mostram que a operação isolada de geradores distribuídos apresentou vantagens como a melhoria de continuidade do serviço na ocorrência de falhas e contingências e melhoria da qualidade do produto (WHITAKER, 2008; CGEE, 2012; PDRI, MCTI, 2015).

Com base nesses fundamentos apresentados sobre as MR, a Figura 2 destaca 4 características básicas que definem uma microrrede.

Figura 2 - Características das Microrredes



Fonte: Elaboração Própria.

2.1.2 Contingências em Microrredes

As interrupções que ocorrem no fornecimento de energia elétrica são inevitáveis e, na maioria das vezes, imprevisíveis, impulsionadas, por causas fortuitas, defeitos na rede, ou por atividades de manutenção programada, preventiva ou preditiva. Essas interrupções podem ter sido ocasionadas por falha (IAB, 2014):

- ✓ na rede da concessionária de distribuição; ou
- ✓ em alguma instalação da rede de transmissão que transporta a energia até a distribuidora; ou
- ✓ em alguma central de geração que supre energia para a rede de transmissão.

Basicamente, a interrupção é ocasionada pela intervenção de dispositivos de proteção que, pela ação da corrente de defeito, são desligados e interrompem o fornecimento a todos consumidores que lhes estão à jusante. Esses defeitos podem ser classificados em defeitos permanentes e defeitos temporários (KAGAN *et al*, 2009).

Os defeitos permanentes são aqueles defeitos que exigem a realização de manutenção corretiva para o reestabelecimento do fornecimento de energia, por exemplo, a queda de uma árvore sobre a estrutura da rede elétrica provocando a ruptura dos fios. Já os defeitos temporários, são aqueles nos quais, por influências externas, ocorreu a abertura de arco entre os alimentadores do sistema, as fases ou o neutro. Na ocorrência de um defeito temporário o restabelecimento de energia é efetuado logo após a ocorrência do mesmo, sem a necessidade de manutenção corretiva, como exemplo, o roçar dos galhos de uma árvore na rede elétrica, provocando a abertura de arco que, pela desenergização da rede, se extingue. (GÓMEZ-EXPÓSITO *et al*, 2011; MARQUES, 2013).

Segundo o Instituto Acende Brasil (IAB) (2014), o evento ou ação que leva o sistema interligado a operar fora de suas condições normais, deixa esse sistema em situação de contingência e a ocorrência desses eventos pode ter origem interna ou externa.

Entre as ocorrências de origem interna destacam-se (LASSERTER, 2002; GARCIA, 2005; BANDEIRA, 2012; MCTI, 2015):

- ✓ Diminuição do recurso energético natural em um determinado período de tempo do ano;
- ✓ Sobrecarga do sistema;
- ✓ Falha de equipamentos ou das estruturas de potência, responsáveis pela distribuição de energia;
- ✓ Planejamento equivocado e/ou erro operacional.

Já as principais ocorrências de origem externa são (PEREIRA JUNIOR et al, 2012; VANDERLINDE et al, 2014):

- ✓ Descargas atmosféricas, tempestades, ventanias, enchentes, quedas de árvores e barrancos;
- ✓ Queimadas próximas aos dispositivos de controle e distribuição de energia elétrica;
- ✓ Acidentes que coloquem o sistema elétrico em contato com objetos que causem interferências ou ainda danifiquem o sistema de operação;
- ✓ Furtos de energia, furtos de cabos e equipamentos, sabotagem dos sistemas de transmissão e/ou distribuição de energia elétrica.

Uma perturbação ao sistema da microrrede é caracterizada quando a ocorrência leva ao desligamento forçado de um ou mais componentes do sistema interligado, resultando em (SOUZA *et al*, 2013; MOREIRA *et al*, 2014):

- ✓ corte de uma ou mais cargas do sistema elétrico;
- ✓ desligamento de outros componentes do sistema;
- ✓ danos em equipamentos, transformadores, linhas, disjuntores, chaves, religadores e bancos de capacitores; ou
- ✓ violação de limites e/ou restrições operacionais do sistema.

2.1.3 Regulação da Qualidade de Energia

Uma vez que um sistema elétrico sempre estará sujeito a ocorrências indesejáveis, é importante que esses sejam projetados, implementados e operados de forma a prover a confiabilidade desejada pelos clientes. Conseqüentemente, o sistema dimensionado adequadamente deverá atender à carga prevista e possuir uma margem de manobra suficiente para lidar com grande parte dessas ocorrências de forma a evitar perturbações, excessivas ou desnecessárias, no fornecimento de energia elétrica (CASARO e MARTINS, 2008; CHOWDHURY *et al*, 2009).

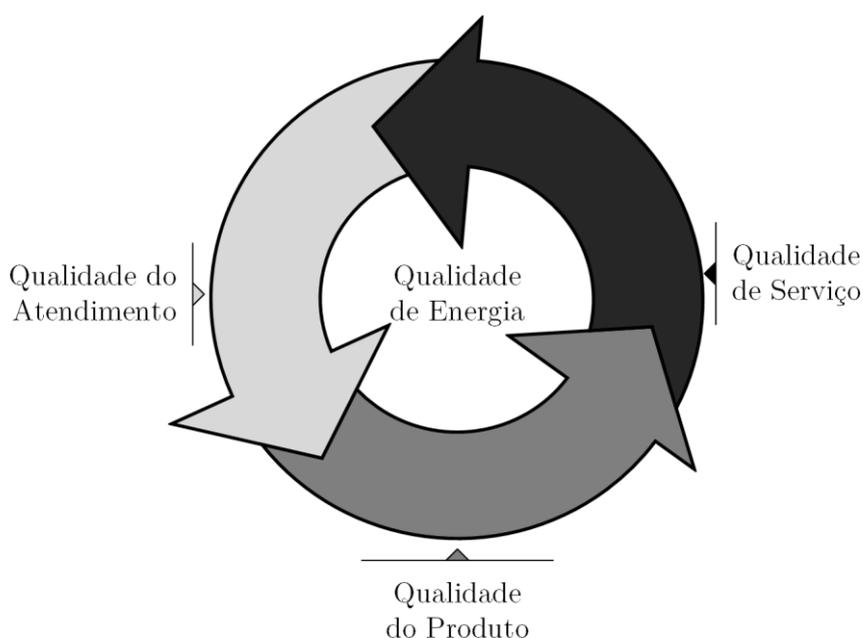
Além de garantir a continuidade do serviço, há também a questão da conformidade da corrente elétrica, ou seja, as restrições técnicas do serviço. Variações do fornecimento de energia elétrica podem prejudicar a operação de aparelhos elétricos ou até mesmo danificá-los. Assim, a energia elétrica em corrente alternada apresenta uma série de propriedades físicas que devem respeitar certos padrões para que não ocorram problemas para a utilização do consumidor final (IAB, 2014).

Tradicionalmente, três conceitos muito utilizados que determinam o resultado final da qualidade do fornecimento de energia elétrica são (KAGAN *et al*, 2009; IAB, 2014; ANEEL, 2015a):

- ✓ A qualidade de serviço, que diz respeito basicamente à continuidade do fornecimento de energia, é classicamente estabelecida através de um conjunto de indicadores estabelecidos pelas entidades reguladoras, com a finalidade de estabelecer os parâmetros de confiabilidade do sistema;
- ✓ A qualidade do produto, em que trata da regulação da conformidade da forma de onda dos componentes de um sistema de energia, variações de frequência e desequilíbrios de tensão e corrente;
- ✓ A qualidade do atendimento, que trata a relação comercial entre a empresa e o cliente, assim como, a garantia do serviço prestado pela concessionária.

A Figura 3 indica essas três variáveis conectadas por meio de setas circulares que indicam a influência contínua que uma característica possui sobre a outra.

Figura 3 - Qualidade no fornecimento de energia



Fonte: Elaboração Própria.

No Brasil, a Resolução Normativa da ANEEL nº 345, de 16 de dezembro de 2008, aprovou os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST (ANEEL, 2008) com a finalidade definir os padrões e normas de qualidade dos sistemas de energia; em 2015 os procedimentos foram revisados, conforme a Resolução Normativa nº 664, de 16 de junho de 2015 (ANEEL, 2015a). O PRODIST tem como objetivo principal reunir as normas de funcionamento da distribuição de energia, abrangendo assuntos relativos às redes, em módulos de estudo. A regulamentação da qualidade do serviço de fornecimento de energia elétrica estabelecido pela ANEEL está contida no Módulo 8 do PRODIST.

Com relação à qualidade do produto de energia elétrica, a ANEEL adotou o nível de tensão como o indicador principal para punição monetária das distribuidoras por eventuais não conformidades com os padrões adotados. Como forma de avaliação do nível

de tensão, o PRODIST, prevê campanhas de leitura trimestrais, realizadas por amostragem, sendo que para cada ponto de medição são realizadas 1008 leituras válidas, de 10 minutos contíguos, somando o total de 168 horas de leitura consecutivas (IAB, 2014).

As tensões apuradas e avaliadas segundo o PRODIST são classificadas em três categorias adequada, precária e crítica. Cada categoria representa um grau de discrepância crescente da tensão contratada. Com o objetivo de pontuar anormalidades relacionadas aos níveis de tensão, foram criados os Indicadores de Conformidade. O Índice de Duração Relativa da Transgressão para Tensão Precária – DRP representa o percentual das leituras em que o nível de tensão estava na faixa de tensão classificada como precária e o Índice de Duração Relativa da Transgressão para Tensão Crítica – DRC indica o percentual de leituras na faixa de tensão crítica. O limite permitido para o DRP é de 3% e para o DRC é de 0,5% (ANEEL, 2015a).

O desempenho das concessionárias quanto à continuidade do serviço prestado de energia elétrica também é aferido pela ANEEL com base em indicadores específicos considerando padrões coletivos, denominados de Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC). O DEC indica o número de horas em média que um consumidor fica sem energia elétrica durante um período, geralmente mensal. Já o FEC indica quantas vezes, em média, houve interrupção na unidade consumidora (ANEEL, 2008).

A ANEEL regula a continuidade do fornecimento de serviço considerando também padrões individuais. Além dos indicadores agregados (FEC e DEC) utilizam-se quatro indicadores individuais. Os indicadores de Duração de Interrupção por Unidade Consumidora (DIC) e Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora (FIC) indicam por quanto tempo e o número de vezes respectivamente que uma unidade consumidora ficou sem energia elétrica durante um período considerado. Já o indicador de Duração Máxima de Interrupção por Unidade Consumidora (DMIC) é um indicador

que limita o tempo máximo de cada interrupção, impedindo que a concessionária deixe o consumidor sem energia elétrica durante um período muito longo. Adicionalmente, foi determinado um indicador especial de Duração de Interrupção Individual ocorrida em Dia Crítico (DICRI) (ANEEL, 2015).

É notável que a principal característica que defini a confiabilidade de um sistema de energia elétrica é a continuidade no abastecimento. A utilização da automação dos sistemas de microrredes permite o acréscimo de geradores próximos as cargas, com a finalidade de garantir o menor índice possível das frequências de interrupções ou do tempo que essas permanecem ativas.

2.1.4 Automação de Microrredes

O conceito de automação pode ser definido como a capacidade que tem uma máquina ou sistema, de dada uma condição tomar uma decisão segundo algum critério (NATALE, 2005). As funcionalidades de automação são divididas de acordo com o segmento do sistema ao qual se aplicam, no panorama das REIs e MRs alguns dos seguimentos mais importantes são: as Subestação de Distribuição (SED), Sistema de Distribuição de Média Tensão (SDMT) e Sistema de Distribuição de Baixa Tensão (SDBT) (AZEVEDO, 2010). No âmbito da automação da distribuição, existem três tipos de componentes (KAGAN *et al*, 2009; BERGER e INIEWSKI, 2015):

- ✓ Equipamentos dos sistemas de distribuição, que são componentes que trabalham, usualmente, sob tensão próxima da nominal do sistema de distribuição e pelo qual transitam altas corrente. Definidos como estruturas de potência, os quais auxiliam no processo de distribuição de energia aos consumidores finais. Estão nesta categoria: os transformadores, as linhas de energia, os disjuntores, as chaves, os religadores e os bancos de capacitores.
- ✓ Dispositivos, que são componentes com função de monitoramento e comando associados aos equipamentos, citados acima. São estruturas de controle que,

usualmente operam com tensões e correntes reduzidas, constituindo sistemas elétricos acessórios justapostos ao sistema elétrico de potência. Incluem nesta categoria os dispositivos de proteção, os Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED), os dispositivos de medição, os microprocessadores, os transdutores analógico-digitais, os transmissores e receptores de dados etc.

- ✓ Sistemas de Tecnologia da Informação, que são softwares que contribuem para o monitoramento, o comando e o controle dos equipamentos. Há sistemas corporativos, como Sistema de Informações Geográficas (GIS), Sistemas Integrados de Gestão Empresarial (ERP) e há sistemas técnicos como Sistema de Aquisição de Dados e Controle Supervisório (SCADA), Sistema de Gerenciamento de Energia (EMS), sistema de Gerenciamento da Demanda (DMS), Sistema de Gerenciamento de Ocorrências (OMS).

Em termos de tensão de operação dos sistemas, as redes de distribuição de energia podem ser classificadas como redes primárias, onde a tensão nominal é superior a 1000V e inferior a 35.000V, ou como redes secundárias apresentando tensão nominal inferior a 1000V (OLIVEIRA *et al*, 2009; PÁDUA *et al*, 2013)

No início do processo de automatização das redes de energia, décadas atrás, os equipamentos presentes nessas redes eram geridos manualmente, assim, os operadores tinham que se deslocar para coletar dados associados a esses equipamentos ou para comandá-los. Entretanto, muito se evoluiu no panorama de automação das redes elétricas. Subestações já podem ser digitalizadas, religadores e chaves podem ser acionadas remotamente e dados de medidores coletados em qualquer lugar de observação (TOLEDO *et al*, 2012).

Impulsionados por essas mudanças, os sistemas baseados em MRs e REIs estão se tornando uma oportunidade de integração dos diversos sistemas automatizados com o objetivo de explorar os resultados individuais de forma coletiva. Por exemplo, apesar das

chaves, religadores e medidores estarem automatizados, esses não necessariamente operam entre si (MCTI, 2015).

2.2 Recursos de Geração Distribuída

A geração distribuída constitui elemento muito importante no âmbito das REIs, porquanto, instaladas junto a carga de baixa tensão ou média tensão, garantem maior confiabilidade e conformidade no fornecimento de energia elétrica (NIST, 2010; PEREIRA *et al*, 2014; BERGER e INIEWSKI, 2015).

A presença da geração distribuída nas redes de distribuição de energia elétrica requer recursos e procedimentos operativos adicionais em relação às redes convencionais, bem como padrões de conexão e práticas de planejamento da expansão. Destacam-se os sistemas de despacho, controle de supervisão apoiados em robusta infraestrutura de telecomunicação de TI (MCTI, 2015).

As Distribuidoras exigem instalações específicas para conexão de geração distribuída. Assim, a ANEEL estabeleceu, por meio da Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012 (ANEEL, 2012), as condições gerais para o acesso da geração distribuída aos sistemas de energia elétrica, além de inserir o sistema de compensação de energia elétrica na rede. Essa Resolução classifica a geração distribuída como: microgeração e minigeração. A microgeração é caracterizada por uma potência instalada menor ou igual a 100kW. Já a minigeração é caracterizada por uma potência instalada superior a 100kW e menor ou igual a 1MW, as duas formas de geração distribuída tem como base fontes de energia elétrica, solar, eólica, hídrica, microturbinas ou cogeração qualificada, conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

Quando se trata de geração distribuída, que quase sempre utiliza fontes primárias limpas e intermitentes, como solar e eólicas, se faz presente a questão de armazenagem de energia. Adicionalmente, essas unidades geradoras são denominadas microfuentes, normalmente, possuem interfaces de eletrônica de potência que permitem

instalação e conexão com a rede ou com esses sistemas de armazenamento auxiliares. Apesar do avanço tecnológico das baterias e de outras formas de armazenagem de energia para fornecimento em períodos relativamente longos, o custo dessas instalações ainda é muito alto (KWHANNET, 2010; TOLEDO *et al*, 2012).

O objetivo de gerar energia de modo distribuído é aproveitar as vantagens de fontes renováveis que emitem pouco carbono e a alta eficiência de sistemas que produzem calor e energia com cogeração. Em seguida, serão abordados alguns recursos para geração distribuída.

2.2.1 Sistemas Fotovoltaicos

Apesar de não serem precisamente definidas na literatura, as aplicações da energia solar são classificadas geralmente como ativas, passivas ou fotovoltaica. As aplicações de energia solar ativa são geralmente preocupadas com a captação da energia térmica por meio de coletores solares que empregam componentes mecânicos ativos, bombas, para coletar e transportar o calor. Em paralelo, os sistemas passivos, geralmente são associados com o ambiente onde são construídos, ou seja, coletam e transportam o calor por meios não mecânicos. Já os sistemas fotovoltaicos utilizam a energia solar para produzir diretamente a eletricidade (HODGE, 2011).

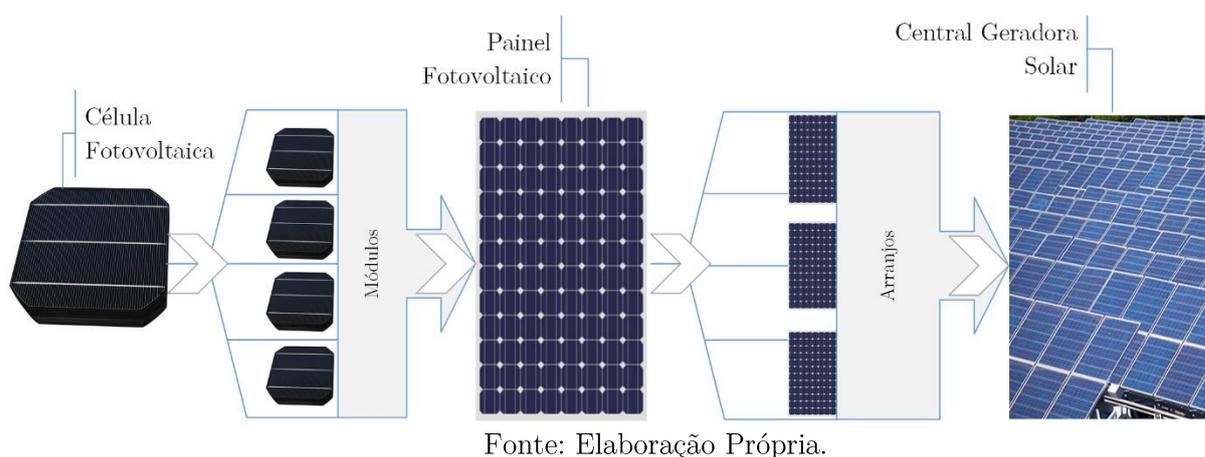
A energia elétrica, proveniente das centrais geradoras solares, é utilizada nas mais diversas áreas com o objetivo de geração de energia elétrica aliada as seguintes vantagens: simplicidade de instalação, facilidade de expansão, elevado grau de confiabilidade do sistema, redução das perdas por transmissão de energia devido à proximidade entre geração e consumo e pouca necessidade de manutenção das placas de geração. Adicionalmente, os sistemas fotovoltaicos são microfones silenciosas e não poluentes de geração de energia elétrica (PEREIRA, 2015)

Relatado por Edmond Becquerel, em 1839, o Efeito Fotovoltaico pode ser explicado sucintamente como o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção de radiação. Essas

estruturas de material semicondutor são denominadas de Células Fotovoltaicas (FRAIDENRAICH e LYRA, 1995; ROSEMBACK, 2004).

Independentemente do tipo de sistema fotovoltaico escolhido para compor uma central geradora solar, o elemento fundamental é a célula fotovoltaica. Essas células são montadas em módulos, que por sua vez, são montados em arranjos, os quais são integrados em sistemas com uma ampla gama de componentes, formando uma Central Geradora Solar (CGS) (SILVA *et al*, 2004; TOLMASQUIM, 2005). A Figura 4 mostra esse processo de confecção de uma CGS através de um conjunto de células fotovoltaicas.

Figura 4 - Central Geradora Solar

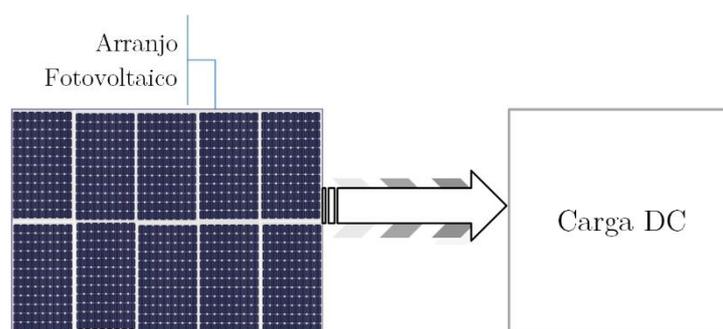


Os sistemas fotovoltaicos se dividem entre os que são independentes e os que são integrados à rede elétrica principal. Esses sistemas podem ser classificados como (MARQUES, 2009; HODGE, 2011; PEREIRA, 2015):

- ✓ Sistemas diretamente acoplados;
- ✓ Sistemas com armazenamento em baterias;
- ✓ Sistemas com energia de reserva (gerador);
- ✓ Sistemas de energia híbrida;
- ✓ Sistemas conectados à rede elétrica;
- ✓ Sistemas para produção de energia elétrica.

Os quatro primeiros itens da lista geralmente são sistemas independentes. Um sistema diretamente acoplado fornece potência em Corrente Contínua, do inglês *Direct Current* (DC), diretamente para a carga. Conseqüentemente, esses sistemas são utilizados para equipamentos que necessitam de baixa potência para funcionalmente, ou seja, aplicações para as quais não há disponibilidade da rede elétrica. Entretanto, sem conexão à rede elétrica, geração de reserva por outra fonte ou capacidade de armazenamento, esses sistemas dependem completamente da irradiação solar para a geração de energia e para a garantia de abastecimento da carga (MCTI, 2015). Um sistema diretamente acoplado é apresentado na Figura 5, como indicado no texto, sua implementação consiste nos arranjos fotovoltaicos conectados diretamente as cargas.

Figura 5 - Esquema de um Sistema Diretamente Acoplado

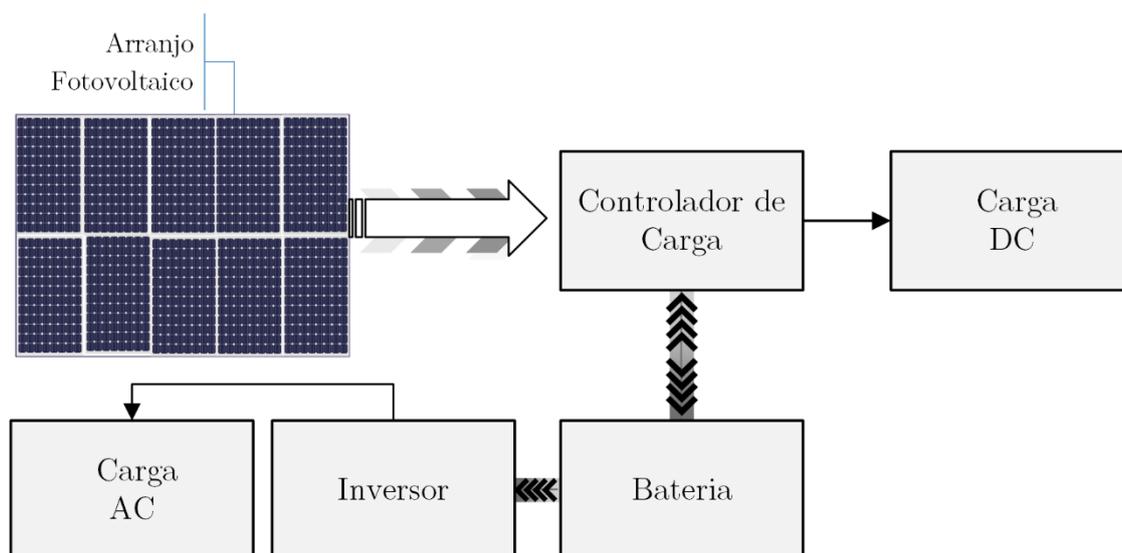


Fonte: Elaboração Própria.

Uma das desvantagens dos sistemas diretamente acoplados consiste na sua incapacidade de abastecer a carga, quando não estão expostos a irradiação solar. Para suprir essa deficiência, os sistemas com armazenamentos em baterias permitem abastecimento das cargas durante a noite quando a irradiação é insuficiente para satisfazer a demanda de energia da carga. Esse sistema inclui, ainda, o controlador de carga, que direciona a saída do arranjo fotovoltaico para a carga e para a recarga das baterias quando estiver sendo gerada a eletricidade, assim, quando o arranjo não estiver gerando energia, o controlador extrai energia elétrica da bateria para a carga. o Controlador de carga possui a capacidade de direcionar a energia das baterias para um conversor de cargas em corrente alternada AC, do inglês *Alternate Current* (HODGE,

2011). A Figura 6 mostra um sistema com armazenamento de baterias, é possível observar o papel do controlador de carga ao direcionar o fluxo de corrente da bateria para o inversor ou para a carga DC.

Figura 6 - Sistema Fotovoltaico Independente com Armazenamento em Baterias

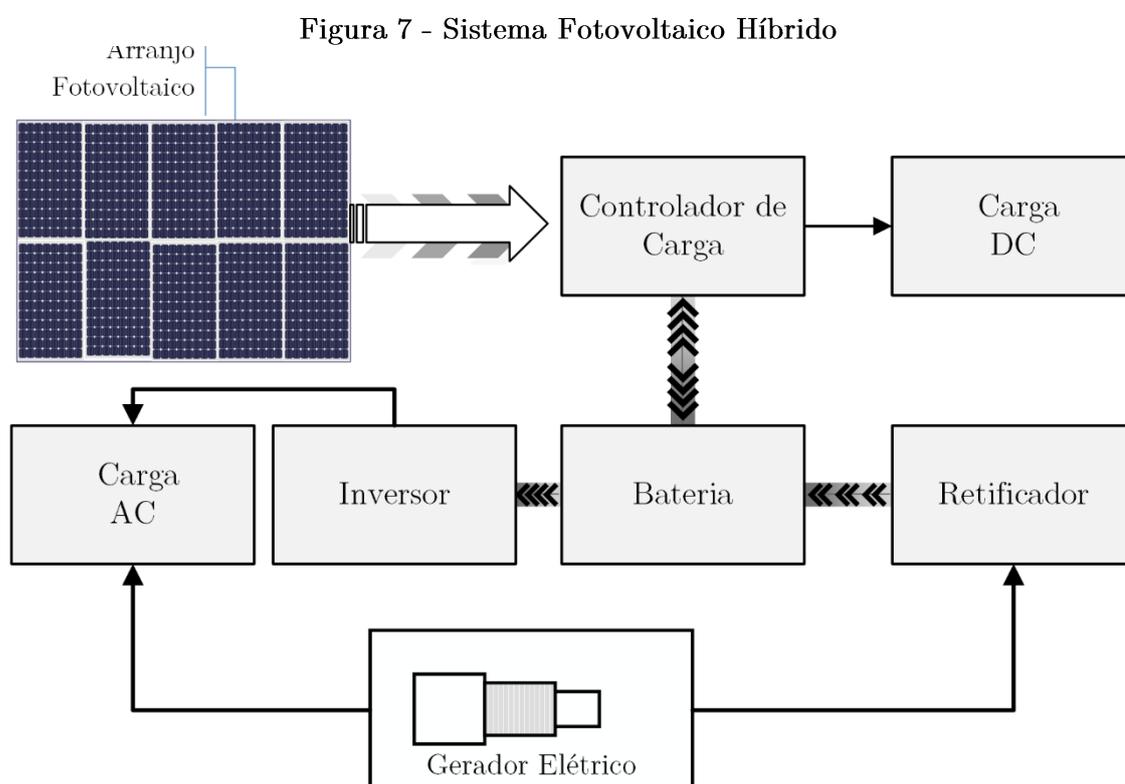


Fonte: Elaboração Própria.

As métricas comuns às baterias utilizadas em sistemas fotovoltaicos incluem a tensão, a capacidade de carga, a capacidade de ciclo e a profundidade de descarga. A tensão, especificada em Volts (V), e a capacidade de carga, classificada em unidades de ampères-horas(Ah), são utilizadas para especificar o potencial de armazenamento e recarga de energia da bateria. A capacidade de ciclo se refere à quantidade de ciclos de carga/recarga mínimos oferecidos pela bateria. Em paralelo, a profundidade de descarga especifica quanto (percentual) da energia armazenada em estado máximo pode ser extraída sem causar danos à bateria (IMHOFF, 2007; SEGUEL, 2009; PEREIRA, 2015).

Outro sistema de grande utilização é o sistema fotovoltaico híbrido. Esse sistema consiste em um sistema independente da rede elétrica, mas que apresenta um gerador secundário que auxilia, junto aos painéis fotovoltaicos, no abastecimento das baterias e/ou cargas DC e/ou AC (MACHADO e MIRANDA, 2015). A Figura 7 mostra a atuação de um gerador, auxiliar e independente da rede, em um sistema fotovoltaico híbrido.

Fonte: Elaboração Própria.

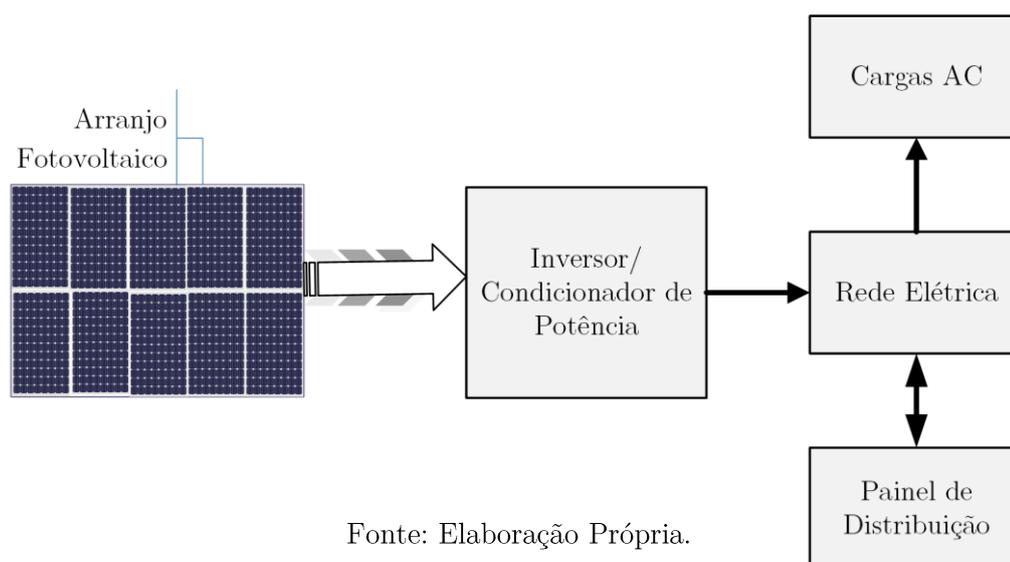


As aplicações, desses sistemas já citados, de pequena potência encontram-se em relógios, calculadoras, sinalização marítima, sinais rodoviários, parquímetros, telefones de emergência, transmissores de TV e de tele móvel ou frigoríficos médicos em locais remotos. Por sua vez, as aplicações de média potência dizem respeito à eletrificação rural, no abastecimento de cargas domésticas em locais remotos sem rede, e como complemento de abastecimento em locais remotos (BOYLE, 2004; BANDEIRA, 2012).

Os sistemas fotovoltaicos podem, também, ser empregados para fornecer eletricidade para a rede elétrica. Em qualquer sistema fotovoltaico conectado a uma rede, a energia, proveniente das estações de geração solar, deve ser compatível com a tensão,

frequência e fase da rede. Nesse caso, é adicionado um inversor/condicionador de potência com a finalidade de padronizar as métricas da geração fotovoltaica com o padrão da rede conectada (BERGER e INIEWSKI, 2015). A Figura 8 apresenta o esquema de funcionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede.

Figura 8 - Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica



Fonte: Elaboração Própria.

2.2.2 Centrais Geradoras Eólicas

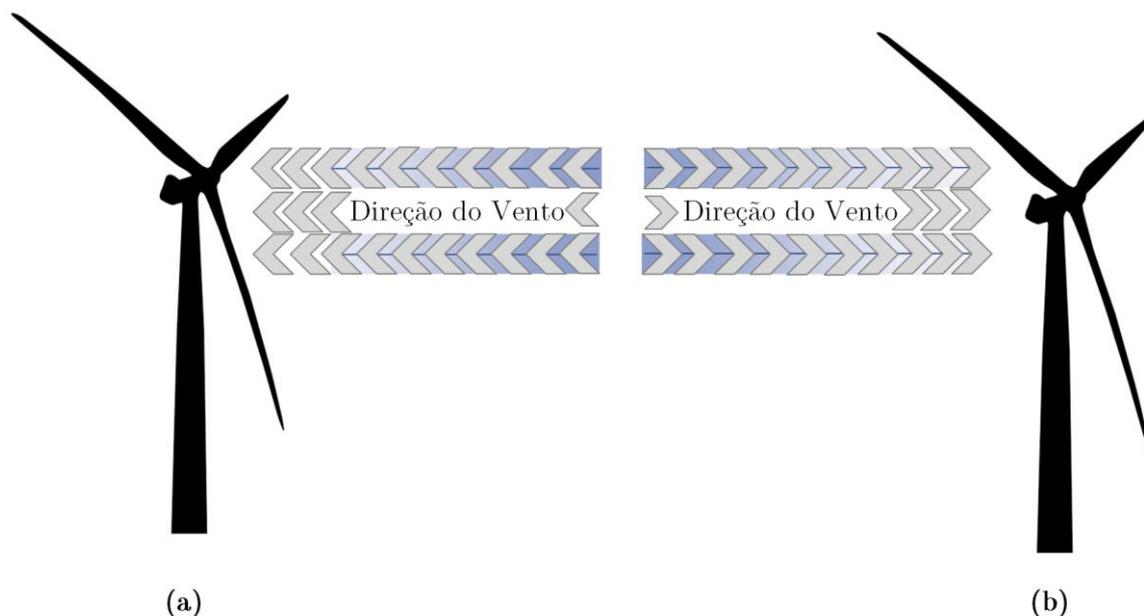
Os dispositivos para aproveitar a energia proveniente dos ventos estão disponíveis em diversos tipos de configurações. As designações fundamentais de um equipamento de energia eólica incluem a turbina eólica com eixo horizontal, do inglês *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) e a turbina eólica com eixo vertical, do inglês *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT), ou seja, os dispositivos VAWTs giram no plano vertical, enquanto que, os HAWTs giram no plano horizontal. (ALCÂNTARA, 2010; MELO, 2012).

As turbinas HAWTs são mais comuns do que as VAWTs e podem ser classificadas quanto à direção de coleta dos ventos em duas categorias, *downwind* e *upwind*. Em uma turbina *downwind* o vento incide na parte traseira da área de varredura da turbina, já em uma *upwind*, o vento incide na parte dianteira (PINTO, 2014b). A

Figura 9.a apresenta o esquema de uma turbina *upwind* e a Figura 9.b uma turbina *downwind*.

Fonte: Elaboração Própria.

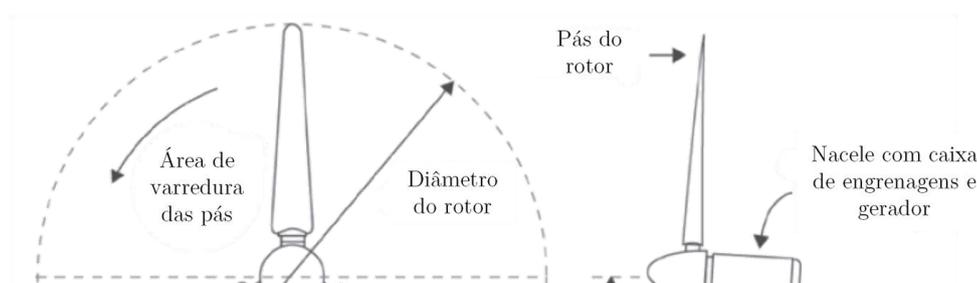
Figura 9 - Esquema de uma turbina *upwind* (a) e de uma turbina *downwind* (b).



Um aerogerador é um equipamento destinado a gerar energia elétrica a partir da energia fornecida pelo vento. A energia cinética do vento movimenta a turbina, que produz energia mecânica, transmitindo-a ao gerador, que em seguida faz a conversão da energia mecânica em elétrica. A capacidade destas turbinas começou com apenas 10 kW, atualmente já existem turbinas de 5 MW e projetos em desenvolvimento para turbinas de 10MW e 15MW para aplicações (BERGER e INIEWSKI, 2015).

A Figura 10 indica um diagrama esquemático que ilustra as partes importantes de uma HAWT, no topo da torre está a nacelle, com uma caixa de engrenagens, os controles e os subsistemas do aerogerador; o rotor é acoplado à caixa de engrenagens e ao gerador por um eixo; o diâmetro do rotor e a área de varredura das pás são indicados, assim como a altura do cubo.

Figura 10 - Diagrama esquemático de uma HAWT



Fonte: Adaptado de Hodge (2011)

Basicamente, como indicado na Figura 10, um aerogerador é constituído dos seguintes componentes (MELO, 2012; PINTO, 2014b; PEREIRA, 2015):

- ✓ Nacele - Componente que abriga diversos dispositivos, tais como, o gerador, o sistema de transmissão de potência (eixos e sistemas hidráulicos) e outros. A nacele pode ter ou não uma caixa de engrenagens (Caixa multiplicadora);
- ✓ Gerador elétrico: Gerador que usa a energia rotacional do eixo para produzir eletricidade via eletromagnetismo (Lei de Faraday), podendo ser convencional (com caixa multiplicadora) ou multipólos (sem caixa multiplicadora);
- ✓ Pás - Dispositivos que capturam a energia do vento e a convertem em energia rotacional no eixo. Tradicionalmente, as pás, são fabricadas a partir de compostos sintéticos, plásticos reforçados com fibras de vidro ou fibras de carbono;
- ✓ Eixo - Componente da turbina responsável por transferir a energia rotacional para uma caixa multiplicadora, no caso de geradores convencionais, ou então diretamente para o gerador, no caso de geradores multipólos;

- ✓ Torre - Elemento que sustenta o rotor e a nacela. A torre de uma turbina é responsável por erguer todo o conjunto a uma altura onde as pás possam girar com segurança e distantes do solo;
- ✓ Cubo - Componente responsável pela transmissão de energia capturada pelas pás para o eixo, juntos, o cubo e as pás, forma o rotor do aerogerador;
- ✓ Caixa de engrenagens - Componente que aumenta a velocidade do eixo entre o cubo do rotor e o gerador;
- ✓ Eixo de alta velocidade com freio mecânico - Eixo acompanhado de dispositivos que freiam a rotação do eixo em situações de ocorrência de sobrecarga de energia ou falha no sistema;
- ✓ Controlador de orientação - Move o rotor para alinhá-lo com a direção do vento;
- ✓ Sistema de resfriamento e sistema hidráulico;
- ✓ Unidade de controle eletrônico - Conjunto operacional que monitora o sistema, desliga a turbina em caso de mau funcionamento e controla o mecanismo de ajuste para alinhamento da turbina com o vento;

Como forma de incentivo a geração distribuída de energia, existem ainda, as microturbinas eólicas. Com saída inferior a 1 kW, essas turbinas estão disponíveis comercialmente e são bem eficientes. Algumas dessas microturbinas estão sendo produzidas para realizar várias tarefas simultaneamente, quais sejam, carregar baterias de veículos elétricos, fornecer energia elétrica para iluminação pública e/ou casas situadas em locais remotos, onde não há fornecimento de eletricidade por uma concessionária (PINTO, 2014b).

2.2.3 Microturbinas a Gás

As turbinas a gás foram desenvolvidas com o objetivo de auxiliarem em aplicações aeronáuticas durante a Segunda Guerra Mundial, ganharam destaque e em seguida foram adaptadas para serem utilizadas como propulsores de aeronaves, turbinas

de combustão ou microturbinas a gás para geração de energia elétrica e até mesmo propulsores marítimos (HODGE, 2011).

As Microturbinas a gás são equipamentos modulares movidos principalmente a gás, de pequeno porte, com potências de até 500kW. Aplicações desses dispositivos estão ligadas ao aumento de confiabilidade do sistema e fornecer energia com reduzidos índices de perdas. Podem ser de dois tipos: um denominado “simples estágio”, pois seu eixo está diretamente conectado entre o gerador e a turbina, produzindo de 1.500 a 4.000Hz; e, outro com “eixo dividido” onde o gerador se conecta a turbina por meio de uma caixa de transmissão. (FELIACHI, 2003; COLANTONI *et al*, 2009).

Uma microturbina operar de duas formas, conectada à rede ou no modo ilhado, onde o sistema permanece conectado apenas à carga. Operando em conectado a microturbina funciona como uma fonte de corrente, conectada à rede principal, o sistema produz potência ativa de acordo com a determinação do operador da máquina.

Uma das características mais desejadas em uma microturbina, que diminuiria bruscamente a taxa de interrupção de energia elétrica num consumidor abastecido por ela e pela rede de energia principal, é a capacidade de transição direta e automática do modo conectado para o modo desconectado da rede. Conseqüentemente, no caso da interrupção do fornecimento de energia pela rede principal, a microturbina se desconecta da rede e continua a fornecer energia para o consumidor. Entretanto, nem todas as microturbinas realizam essa transição diretamente, sendo necessário primeiro desligá-las para só depois reiniciá-las em um outro modo de operação, tal processo demora pelo menos 3 minutos (SANTOS, 2012).

Entre as principais vantagens da utilização das microturbinas como forma de geração distribuída em uma rede de energia pode-se citar (BONA e RUPPERT FILHO, 2004; DA SILVA, 2011):

- ✓ Alta durabilidade;

- ✓ Projeto simples, que permite redução considerável de custos e grandes volumes de fabricação de componentes associados as microturbinas de geração das centrais eólicas;
- ✓ Trabalham com baixas pressões;
- ✓ São compactas, fáceis de instalar e de reparar;
- ✓ Eficiência razoável (30-33%), podendo chegar uma eficiência total de 80% com o uso da cogeração;
- ✓ Emissões atmosféricas baixas devido à combustão contínua;
- ✓ Dimensões reduzidas: uma microturbina de 30 kW tem aproximadamente a dimensão de um refrigerador doméstico;
- ✓ Flexibilidade de combustível: pode ser utilizado gás natural, diesel, biogás e propano
- ✓ Dependendo do modo de operação permitem cogeração;
- ✓ Modularidade: as conexões da microturbina com a rede/carga são feitas de modo *plug-and-play*, podendo conectar diretamente em paralelo até 20 microturbinas sem necessidade de equipamentos adicionais;

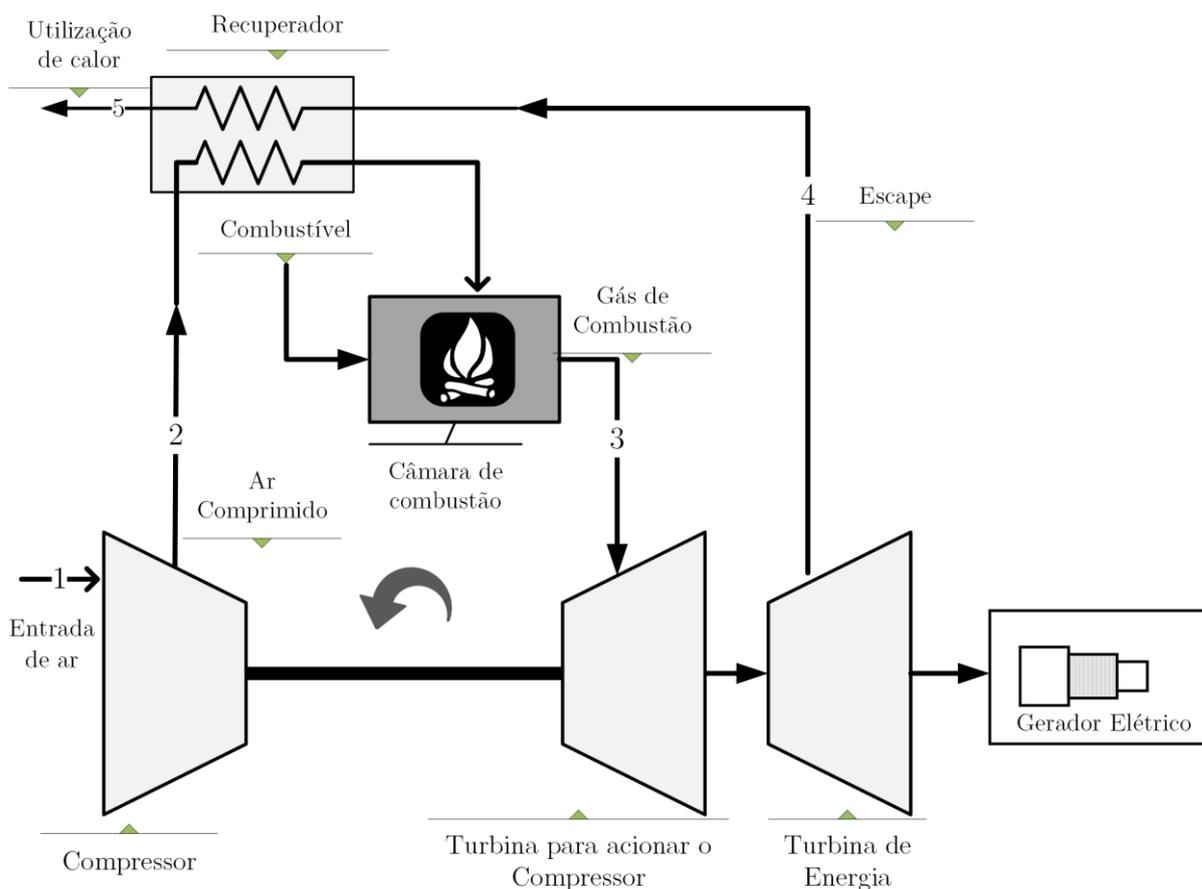
Os componentes básicos de uma microturbina são: o compressor, a câmara de combustão, a turbina e o gerador elétrico. Durante o seu funcionamento, o ar é aspirado da atmosfera e comprimido, passando para a câmara de combustão, onde é aquecido pela combustão. Nesta câmara ocorre a reação de combustão, produzindo gases quentes, que escoam através da turbina, onde se expandem, produzindo potência mecânica para acionar o eixo do compressor e da carga, que pode ser um gerador elétrico (MALDONADO, 2010; HODGE, 2011).

Com o objetivo de aumentar o rendimento da microturbina é comum a integração de um recuperador de calor (regenerador) que permite aproveitar o calor disponível nos gases de escape para pré-aquecer o ar comprimido que chega ao combustor. Esse componente aumenta em muito a eficiência da microturbina (de 16% para 33%

aproximadamente) e é utilizado em quase todas as microturbinas comerciais encontradas (BONA e RUPPERT FILHO, 2004; COLANTONI *et al*, 2009; HERRERA, 2015).

O modelo de uma microturbina a gás com um recuperador de calor é apresentado na Figura 11, nesse modelo é apresentado um estado 5, uma unidade para utilização de calor que pode servir para o aproveitamento da energia térmica em uma outra aplicação.

Figura 11 - Sistema de uma microturbina a gás com recuperador de calor



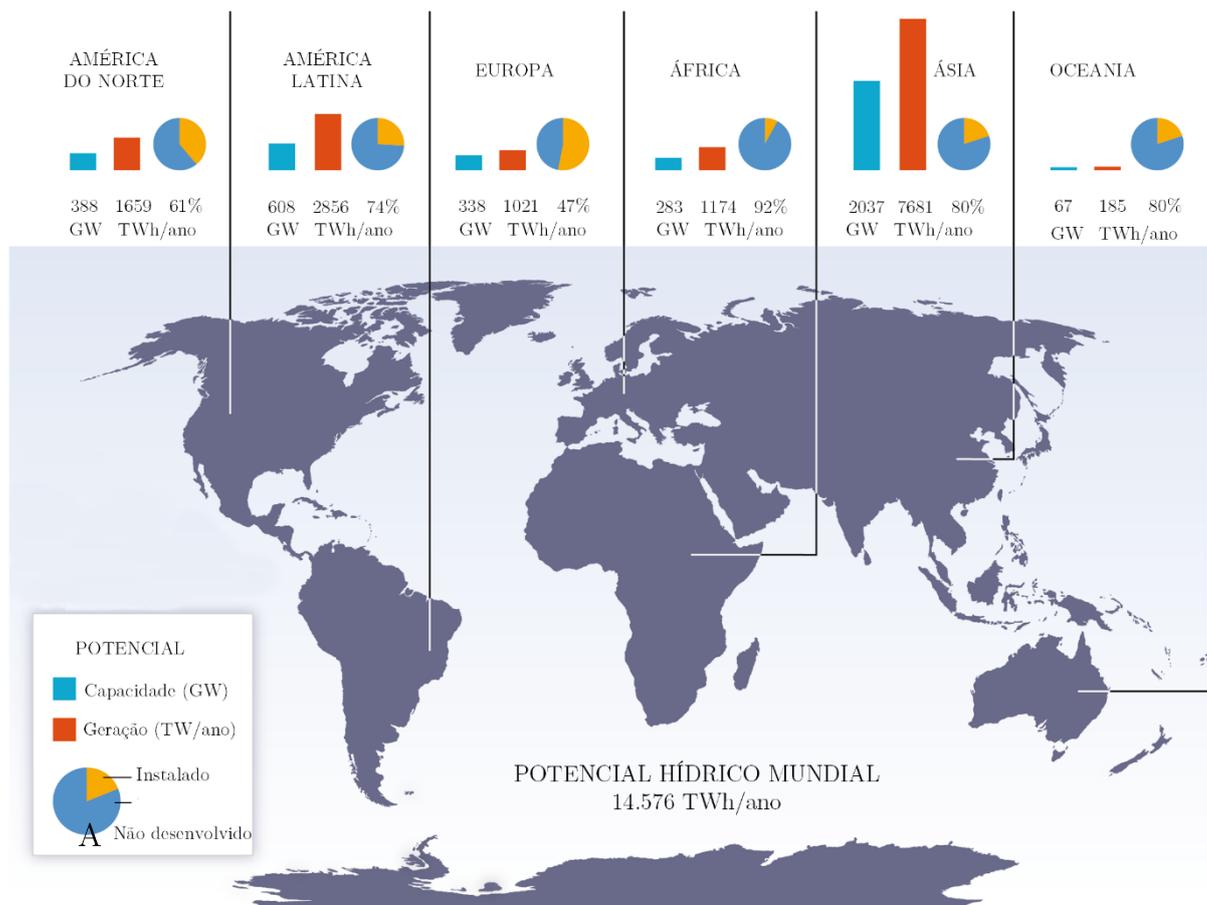
Fonte: Elaboração Própria.

2.2.4 Hidroeletricidade

A hidroeletricidade é uma das melhores, mais baratas e limpas fontes de geração de energia elétrica. O conceito de hidroeletricidade nasceu para definir a geração de eletricidade por meio da conversão da energia cinética da água em energia potencial mecânica, que acionará um conjunto turbina-gerador e, conseqüentemente, produzirá energia elétrica. Ao contrário das demais fontes renováveis, representa uma parcela

significativa da matriz energética mundial e possui tecnologias de aproveitamento devidamente consolidadas (ANEEL, 2005). A Figura 12 mostra o potencial técnico global, em 2012, para geração hídrica de 14.576 TWh/ano, o que corresponde a uma capacidade instalada de 3721 GW, valor quatro vezes maior do que a capacidade instalada.

Figura 12 - Potencial de hidroeletricidade global

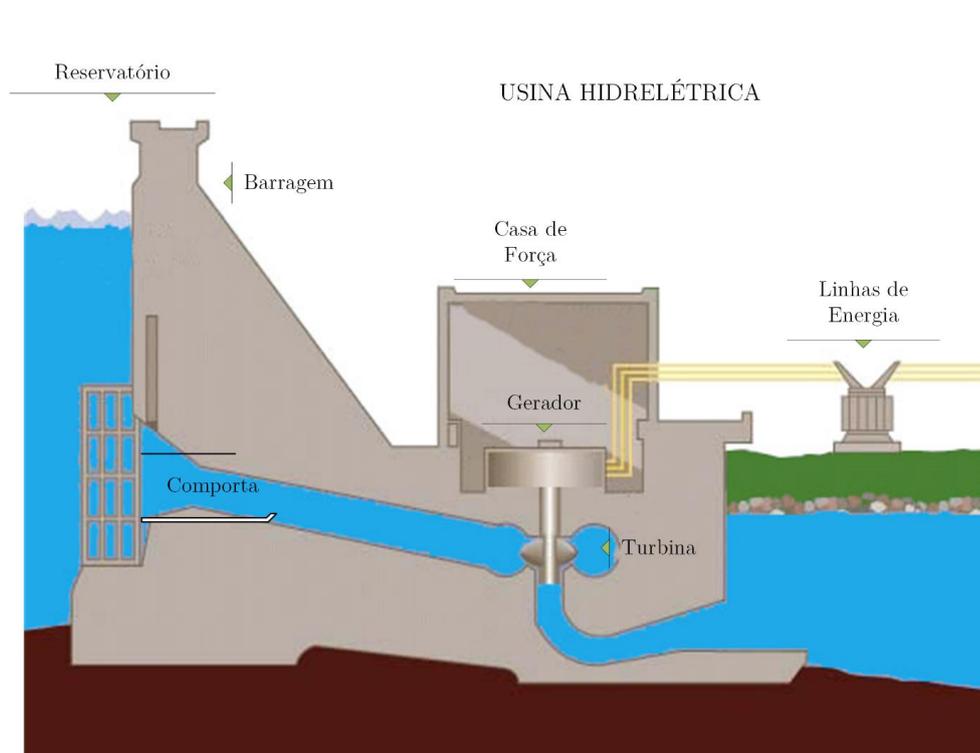


Fonte: Adaptado de RESCCM (2012).

A usina hidrelétrica é composta, basicamente, por barragem, sistema de captação e adução de água, casa de força e vertedouro, que funcionam em conjunto e de maneira integrada. A construção de uma usina em um rio exige a construção de uma barragem para represa-lo, formando, na área, um reservatório. Além de estocar a água, esses reservatórios têm outras funções: permitem a formação do desnível necessário para a configuração da energia hidráulica, a captação da água em volume adequado em períodos de chuva ou estiagem, onde poderiam ocorrer decréscimos na vazão do rio (ROSA, 2007;

PINTO, 2014a). A Figura 13 apresenta os componentes principais de uma usina hidrelétrica.

Figura 13 - Esquema de uma usina hidrelétrica mostrando seus componentes



Fonte: Adaptado de PINTO (2014a)

Os sistemas de captação e adução são formados por estruturas de túneis, canais ou condutos metálicos que levam a água até a casa de força. É nesta instalação que estão as turbinas, formadas por uma série de pás ligadas a um eixo conectado ao gerador. Durante o seu movimento giratório, as turbinas convertem a energia cinética, movimento da água, em eletricidade por meio dos geradores. Em seguida, a água é conduzida ao leito natural do rio pelo canal de fuga do sistema. Por último, há o vertedouro, que permite a saída da água quando os níveis do reservatório ultrapassam os limites máximos (ANEEL, 2009).

Os principais tipos de turbinas hidráulicas são: Pelton, Kaplan, Francis e Bulbo. Cada turbina é adaptada para funcionar em usinas com determinada faixa de altura de

queda e vazão. A turbina tipo Bulbo é usada nas usinas fio d'água por ser indicada para baixas quedas e altas vazões, não exigindo grandes reservatórios (ANEEL, 2009).

As usinas hidrelétricas são classificadas em algumas categorias de acordo com a sua capacidade de geração de energia. Essas faixas de definição variam de país para país, sendo assim, não existe um consenso mundial. No Brasil, a ANEEL classifica como uma Usina Hidrelétrica de Energia (UHE) as instalações com capacidade acima de 30 MW; define ainda, uma Central Geradora Hidrelétrica (CGH) como instalações com potencial de até 3MW; e por fim, as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), as quais correspondem a geração superior a 3MW e inferior a 30MW (ANNEEL, 2015).

Instaladas em rios de pequeno e médio porte, as PCH são, geralmente são usinas a fio d'água, ou seja, seus reservatórios não permitem um escoamento regular de água. Dessa forma em momentos de seca as turbinas podem ficar ociosas. De fato, a maioria das vezes, não ocorre a formação de um reservatório típico de uma usina hidrelétrica (GOLDEMBERG, 2010; PINTO, 2014a)

De acordo com a Resolução nº 673 de 4 de Agosto de 2015 da ANEEL, no caso de uma PCH, a área do reservatório deve ser inferior a 13km², excluindo a calha do leito regular do rio, valores superiores poderão ser validados após deliberação técnica da ANNEEL. Dados do Banco de Informações de Geração (BIG) mostram 456 PCHs com uma potência total outorgada de 4.805 MW e 548 CGHs com uma potência total outorgada de 407 MW (ANEEL, 2016).

O custo da energia elétrica de uma PCH é menor do que uma UHE, como também é menor o seu impacto ambiental. Outro ponto positivo de uma PCH é o seu tempo de instalação, cerca de 18 meses, além de não exigir o deslocamento da população local e nem a emissão de CO₂. Adicionalmente, a manutenção desses sistemas é simples e de custo relativamente baixo. Dessa forma, esse tipo de empreendedorismo possibilita um melhor atendimento às necessidades de carga de pequenos centros urbanos e regiões rurais (PERIUS e BONFIM, 2012).

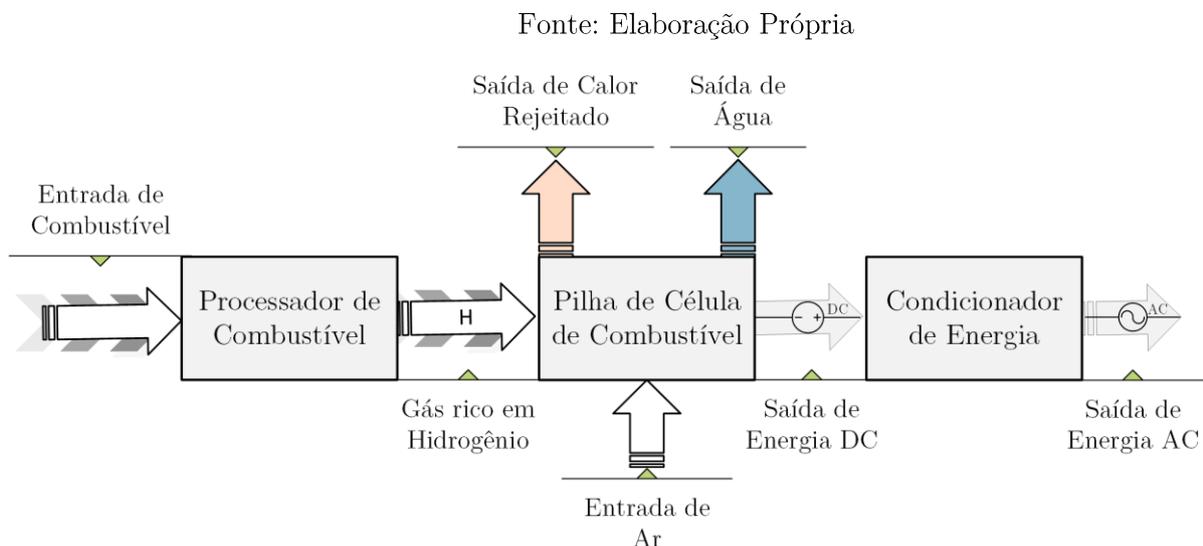
2.2.5 Células Combustíveis

Tradicionalmente, em qualquer sistema de combustão convencional, um combustível reage com um oxidante, oxigênio, para liberar a energia química armazenada no combustível na forma de calor. Em uma estrutura de célula combustível, a energia química armazenada no combustível é convertida em eletricidade, sem passar pelo processo de combustão, produzindo individualmente entre 0,5 e 0,9 V de eletricidade DC (WENDT *et al*, 2000; HODGE, 2011).

As células combustíveis e as baterias produzem corrente contínua, através de um processo eletroquímico na ausência da combustão direta de uma fonte de combustível. Contudo, uma bateria só pode fornecer energia armazenada, fonte finita, mas uma célula combustível pode funcionar ininterruptamente contanto que esteja disponível uma fonte de combustível adequada. Geralmente, essas células são combinadas em pilhas, com a finalidade de produzir tensão e potência de saída utilizáveis (PERLES, 2008).

Um sistema de células de combustível é composto por três componentes: um reformador de combustível (processador) que gera gás rico em hidrogênio a partir do combustível; uma seção de energia onde ocorre o processo eletroquímico; e um condicionar/inversor de energia que realiza a conversão da eletricidade em corrente contínua para corrente alternada, realizando a configuração padrão da rede elétrica (TOLEDO *et al*, 2012). Um diagrama de blocos do sistema de uma célula combustível é apresentado na Figura 14 e ilustra esse procedimento de geração de energia elétrica, é possível observar que quando o hidrogênio é utilizado como combustível e oxigênio como oxidante, ocorre além da geração de eletricidade, a formação de água e produção de calor.

Figura 14 - Diagrama de blocos da célula combustível



Os sistemas baseados em células combustíveis para geração distribuída produzem eletricidade com eficiência entre 40% e 60%, com emissões reduzidas e de forma tão silenciosa que podem facilmente ser utilizadas em ambiente urbano. Sua interface com a microrrede se dá muitas vezes por meio de inversores e possuem um potencial entre 1 kW a 10 MW (ALCÂNTARA, 2013).

2.2.6 Sistemas de Armazenamento

São sistemas com a capacidade de armazenar energia elétrica através de potencial eletromagnético, eletroquímico ou cinético. Assim, para que a energia seja utilizada em corrente alternada, primeiramente ela deve ser transformada através de um conversor, que pode ser associado a cada fonte, caracterizado pela quantidade de energia armazenável e a taxa de transferência para a saída do sistema (MCTI, 2015).

A utilização dos sistemas de armazenadores de energia em uma microrrede é essencial para garantir confiabilidade de energia às cargas. Algumas microfontes de energia não possuem capacidade de manter a tensão e frequência durante certas condições de operação da rede central, ou em certos horários do dia. Consequentemente, os sistemas de armazenamento de energia podem ser utilizados para garantir a qualidade de energia

na MR, e assim, permitir que cargas críticas possam continuar conectadas na MR mesmo quando a MR está funcionando de modo ilhada (IEA, 2014).

Os veículos elétricos são exemplos de recurso energético distribuído que reúne as modalidades de consumo, geração e armazenamento, e, ainda, a mobilidade. Veículos puramente elétricos, híbridos com tração suportada por motores elétricos ou a combustão são pesquisados, produzidos e testados no mundo. O avanço tecnológico na produção de sistemas de armazenamento mais leves e mais econômicas tem encorajado a perspectiva da presença mais efetiva de veículos elétricos na matriz de transporte brasileira (CGEE, 2012; BERGER e INIEWSKI, 2015).

Entre os principais tipos de tecnologias de armazenamento, destacam-se: os Sistemas de Armazenamento Baseado em Supercondutores Magnéticos (do inglês, *Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES*), Sistemas de Armazenamento por Baterias (SAB), Sistemas de Capacitores Avançados (SCA) e os sistemas *Flywheel* (BERGER e INIEWSKI, 2015).

2.2.6.1 Sistemas de Armazenamento Baseado em Supercondutores Magnéticos

O armazenamento de energia é uma forma de tornar a utilização de energia mais eficiente. O SMES utiliza uma bobina supercondutora capaz de armazenar energia elétrica no campo magnético gerado pela corrente que flui através dela. A potência ativa bem como a potência reativa pode ser absorvida ou liberada do SMES de acordo com as necessidades de energia do sistema. Esse sistema apresenta-se como uma das formas mais eficientes para falhas momentâneas, pois, apresentam baixas perdas com um rendimento de 90%, tendo já em conta as perdas do sistema de refrigeração (CARMO *et al*, 2012).

Basicamente a composição de um SMES compreende em uma bobina supercondutora, um sistema criogênico (sistema de refrigeração), um conversor eletrônico, sistema de condicionamento, funções de controle e proteção. As vantagens desse sistema são requeridas em duas aplicações: controle e estabilização dos sistemas de transmissão e distribuição; e aplicações em qualidade da energia (NOMURA *et al*, 2010).

2.2.6.2 Sistemas de Armazenamento por Baterias (SAB)

Os sistemas de armazenamento por baterias, utilizam os princípios das baterias como uma poderosa vantagem em relação ao custo-benefício. As baterias são compostas de vários módulos de baixa potência/tensão conectados em série e em paralelo, de modo a atingir as características elétricas desejáveis. Tradicionalmente, as baterias são divididas em primárias, aquelas que não podem ser recarregadas; e secundárias, as quais podem ser carregadas. As baterias utilizadas nos SAB são as secundárias (TOLEDO *et al*, 2012).

A utilização das baterias de níquel-hidreto metálico, nos sistemas SAB, constitui uma alternativa para minimizar os problemas com o descarte de baterias usadas (AMBROSIO e TICIANELLI, 2001), já que estas não possuem chumbo ou cádmio na sua composição, o que vem a reduzir problemas relacionados à contaminação ambiental por metais pesados. Essas baterias possuem eficiência de ciclo notável e são usadas em baixa órbita da terra, onde painéis solares as carregam 16 vezes por dia, durante 5 mil ciclos de carga e descarga operados a cada ano. Junto com as baterias de Lítio-íon e as células combustíveis, as baterias de níquel-hidreto formam as principais aplicações de suporte e abastecimento dos veículos elétricos (BERGER e INIEWSKI, 2015).

2.2.6.3 Sistemas de Capacitores Avançados (SCA)

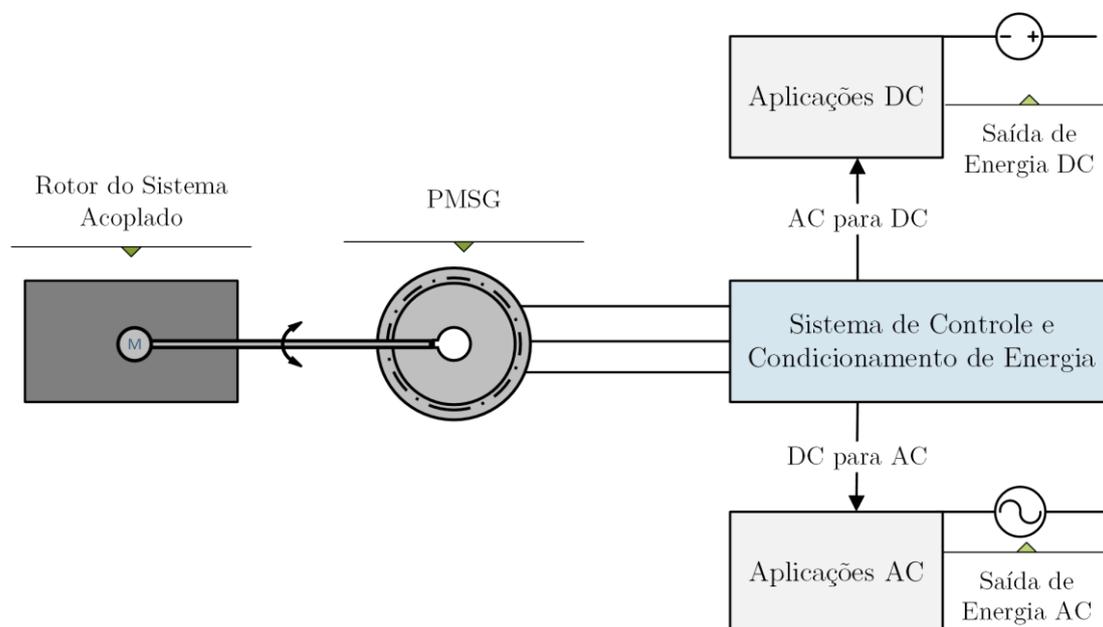
Os sistemas de capacitores avançados armazenam energia polarizada, em paralelo, separados por um meio dielétrico isolante. Os supercapacitores possuem uma dupla camada de capacitores, o que aumenta a eficiência do sistema, chegando a apresentar capacitâncias de até 10.000 *Farads*. As aplicações são diversas em DC ou AC. Como exemplo, os supercapacitores são utilizados para dar partida em equipamentos que precisam de pulsos curtos de alta corrente, como por exemplo, em motores para locomotivas, veículos elétricos e motores a diesel. Em sistemas automotivos são muito utilizados nos freios regenerativos dos veículos elétricos e híbridos (TOLEDO *et al*, 2012).

Os problemas de flutuações de tensão (GALLO *et al*, 2004; MACEDO JUNIOR e SIMONETTI, 2012) podem ser resolvidos com a utilização desses sistemas, e garantem a preservação dos bancos de baterias que geralmente são utilizados em casos de quedas de tensão mais prolongadas. Tradicionalmente, os SABs são combinados com as baterias em muitas configurações diferentes para alcançar o desempenho desejado (ABAQUE, 2015).

2.2.6.4 Sistemas *Flywheel*

Os sistemas de armazenamento de energia do tipo *flywheel*, ou volantes de inércia, são constituídos pelos seguintes componentes: o rotor, o motor-gerador e o sistema de controle e condicionamento de energia. Basicamente, esses dispositivos armazenam energia na forma cinética como energia rotacional. O rotor é a parte principal do volante de inércia, é ele que armazena a energia por meio do seu momento de inércia e sua velocidade angular, é comum em aplicações conjuntas com turbinas eólicas a utilização de um gerador síncrono com ímã permanente, o PMSG (do termo em inglês – *Permanet Magnet Synchronous Generator*) (MOREIRA, 2008).

Esses sistemas podem ser usados para armazenar energia para sistema de potência quando estão acoplados a uma máquina elétrica. São utilizados como sistemas de armazenamentos em aplicações espaciais chegando a armazenar, 6,5kW, de 130 a 170 V, de corrente contínua. Também podem ser utilizados em combinação com sistemas eólicos, contribuindo para a estabilização da variabilidade na geração da energia, característica destes sistemas. Os *Flywheels* estão substituindo os bancos de baterias, devido a seu menor custo de manutenção e operação e a sua capacidade de operar em condições adversas de temperatura sem afetar sua vida útil (IEA, 2014). A Figura 15 apresenta um sistema *flywheel*, com um rotor, um gerador PMSG e um sistema inversor de potência DC/AC e AC/DC.

Figura 15 - Sistema de armazenamento de energia do tipo *flywheel*

Fonte: Elaboração Própria

2.3 Redes Inteligentes de Energia

Tradicionalmente, o conceito de Redes Elétricas Inteligentes (REI), do inglês *Smart Grids*, abrange toda a conversão de energia elétrica, transmissão, distribuição e ciclo de utilização. Elas são compostas por atuadores avançados, sensores, infraestrutura de comunicação, sistemas de Tecnologia de Informação (TI), monitoramento avançado, controle e aplicações para tomada de decisão, de modo a permitir que a rede elétrica, por meio de análises e diagnósticos em tempo real, se reconfigure automaticamente para atender, de forma otimizada, às suas necessidades (BANDEIRA, 2012; KAGAN, 2013; PEREIRA *et al*, 2014; BERGER e INIEWSKI, 2015).

O conceito inclui, ainda, a gestão pelo lado da demanda, que, através de incentivos aos clientes, permite interrupções de cargas críticas nas unidades consumidoras em períodos predefinidos, para otimizar a utilização dos recursos e adequar

continuamente a oferta com a demanda de energia, bem como para reduzir os impactos aos clientes em situações emergenciais (TOLEDO *et al*, 2012).

Tais benefícios podem ser obtidos através da interação com fontes de geração e armazenamento distribuídos de energia, conectados diretamente na rede ou nas unidades consumidoras. Dessa forma, ganhos sinérgicos são alcançados através de interações entre diferentes elementos do sistema elétrico, como, por exemplo, medição, dispositivos de rede, fontes de geração e armazenamento de energia e carga (NETL, 2009).

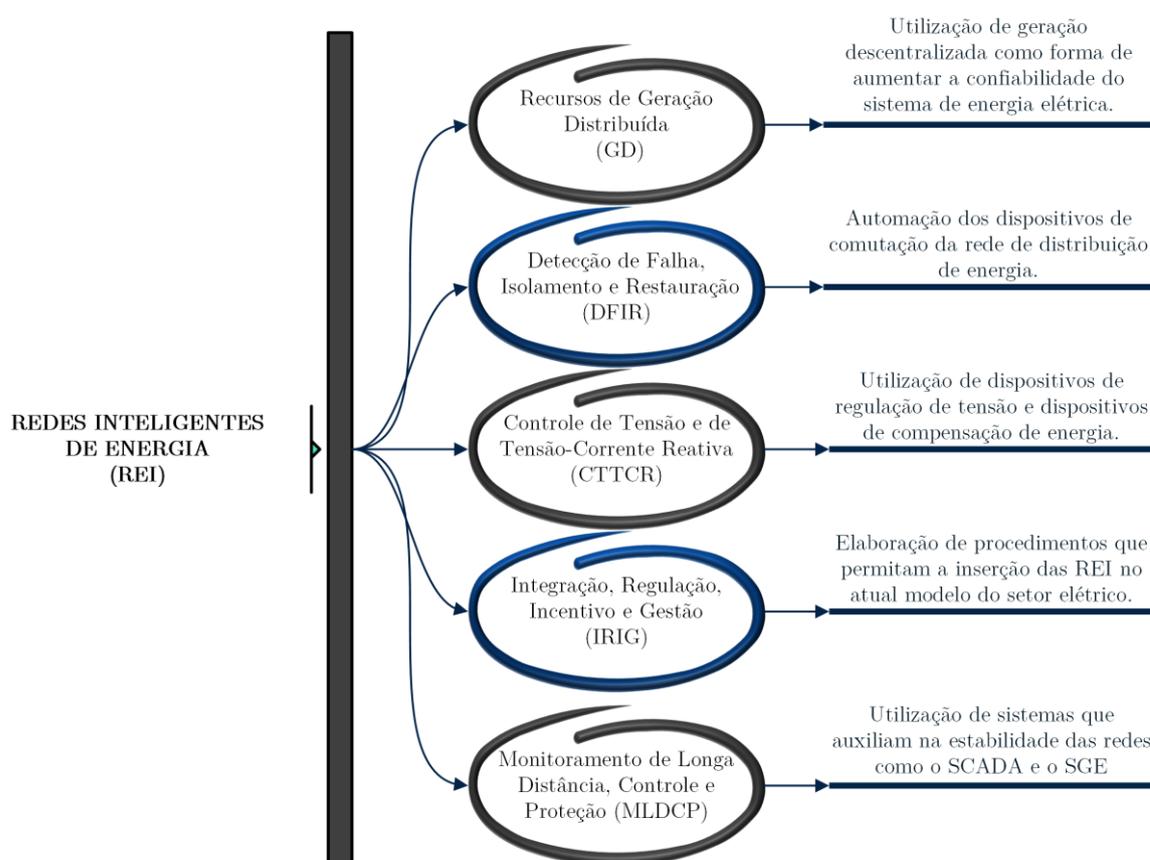
Berger e Iniewski (2015) definem as redes inteligentes como uma combinação de tecnologias, hardware, software ou práticas que, em conjunto, permitem que a rede de energia elétrica atenda de forma mais confiável, versátil, segura, resiliente e útil aos consumidores. Dessa forma, os objetivos esperados com a implementação das REIs são (CGEE, 2012; MOURA *et al*, 2013; MCTI, 2015):

- ✓ Integrar diversos recursos de geração de energia, inclusive as intermitentes fontes de energia renovável;
- ✓ Melhorar a eficiência e economia na conversão de energia, transmissão, distribuição e utilização;
- ✓ Suportar a integração de geração distribuída, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa;
- ✓ Aperfeiçoar a segurança da rede e a segurança na operação do sistema, aumente a capacidade de observação e de controle da rede elétrica;
- ✓ Promover um comprometimento ativo no lado da demanda, isto é, uma maior participação do consumidor no uso da rede elétrica;
- ✓ Melhorar a confiabilidade e a disponibilidade do fornecimento de energia para os clientes;
- ✓ Permitir a utilização de tarifas dinâmica, permitindo que dispositivos inteligentes medidores inteligentes, do inglês *smartmeters*, ajustem a utilização da energia elétrica com base nos preços variáveis de acordo com a carga;

-
- ✓ Transformar a rede elétrica, permitindo o fluxo de potência em diferentes direções, em momentos diferentes, e de diferentes fontes para diferentes cargas;
 - ✓ Permitir a participação ampla de equipamentos de armazenamento de energia nas instalações do cliente, para armazenar energia quando a mesma estiver excedente e/ou com geração muito barata. Tal energia armazenada pode ser utilizada de forma inteligente e eficiente quando ocorrer o inverso, isto é, oferta de energia insuficiente;
 - ✓ Contribuir para que todo o vasto sistema de geração, transmissão e distribuição seja mais robusto e confiável. Uma rede inteligente possui, entre outras habilidades, a capacidade de se recuperar de distúrbios de forma autônoma *self-healing*, sendo, dessa forma, mais resistente a falhas de equipamentos ou outros problemas;
 - ✓ Reduzir os custos de operação e manutenção, com efetiva economia para os clientes finais.

As principais áreas de atuação das pesquisas encontradas na literatura sobre as REIs estão indicadas na Figura 16, incluindo novas fontes de energia, dispositivos de comunicação, medição e controle e os demais componentes que de forma coletiva abordam os principais objetivos das REIs em relação à eficiência energética, à confiabilidade do sistema, à participação do consumidor e dos órgãos públicos e à sustentabilidade.

Figura 16 - Aplicações e pesquisas das redes inteligentes de energia



Fonte: Elaboração Própria.

As REIs são ativadas por tecnologias das seguintes categorias (TOLEDO *et al*, 2012; ONWUNTA e KAHN, 2014; JOSEPH, 2015):

- ✓ Sensores - tensão, sensores de corrente, medições de fluxo de potência, pressão acústicos, temperaturas e sensores mais avançados, tais como sincrofasores;
- ✓ Sistemas de Comunicação;
- ✓ Atuadores - geradores, capacitores, reatores, geradores distribuídos, armazenamento de energia;

- ✓ Computadores para reguladores de tensão;
- ✓ Controladores - dispositivos para efetuar mudanças nos atuadores, tais como os Sistemas de Transmissão Flexíveis em AC (FACTS), do inglês, *Flexible AC Transmission Systems*, controladores, controladores de capacitores, sistemas de armazenamento de energia;
- ✓ Aplicações que determinam a tomada de decisão automática da rede, por meio de plataformas computacionais;
- ✓ Infraestrutura para suporte de TI, tais como o Sistema Supervisório e de Aquisição de Dados (SCADA), do inglês Supervisory Control and Data Acquisition ou o Sistema de Gerência de Distribuição (DSM), do inglês *Distribution Management System*;
- ✓ Aplicações de apoio como modelagem de rede, previsão de carga, estimativa de estado, fluxos de energia.

A tecnologia *Smart Grid* trouxe consigo desafios e oportunidades nas áreas de GD, DFIR, CTTCR, IRIG e MLDCP, sempre com o objetivo de resolver problemas específicos de uma área maior e que atinge diretamente o consumidor final, a gestão pelo lado da demanda. Esse fato pode ser observado ao analisar o escopo final de atuação de cada área. O CTTCR tem como objetivo reduzir a perda de energia e gerenciar a demanda de pico no sistema de distribuição. O MLDCP consiste em aplicações auxiliares que garantem, aos sistemas de transmissão, proteção e monitoramento integral. O campo de atuação das áreas de GD e IRIG administram o envio de resposta à demanda e recursos de energia aos clientes. Já o conceito tratado no escopo de DFIR está em administrar, detectar, isolar e recuperar energia para os clientes afetados após uma falha (CAMILLO, 2013; ONWUNTA e KAHN, 2014; BERGER e INIEWSKI, 2015; ALSHARIF *et al*, 2016).

2.3.1 Gestão pelo Lado da Demanda

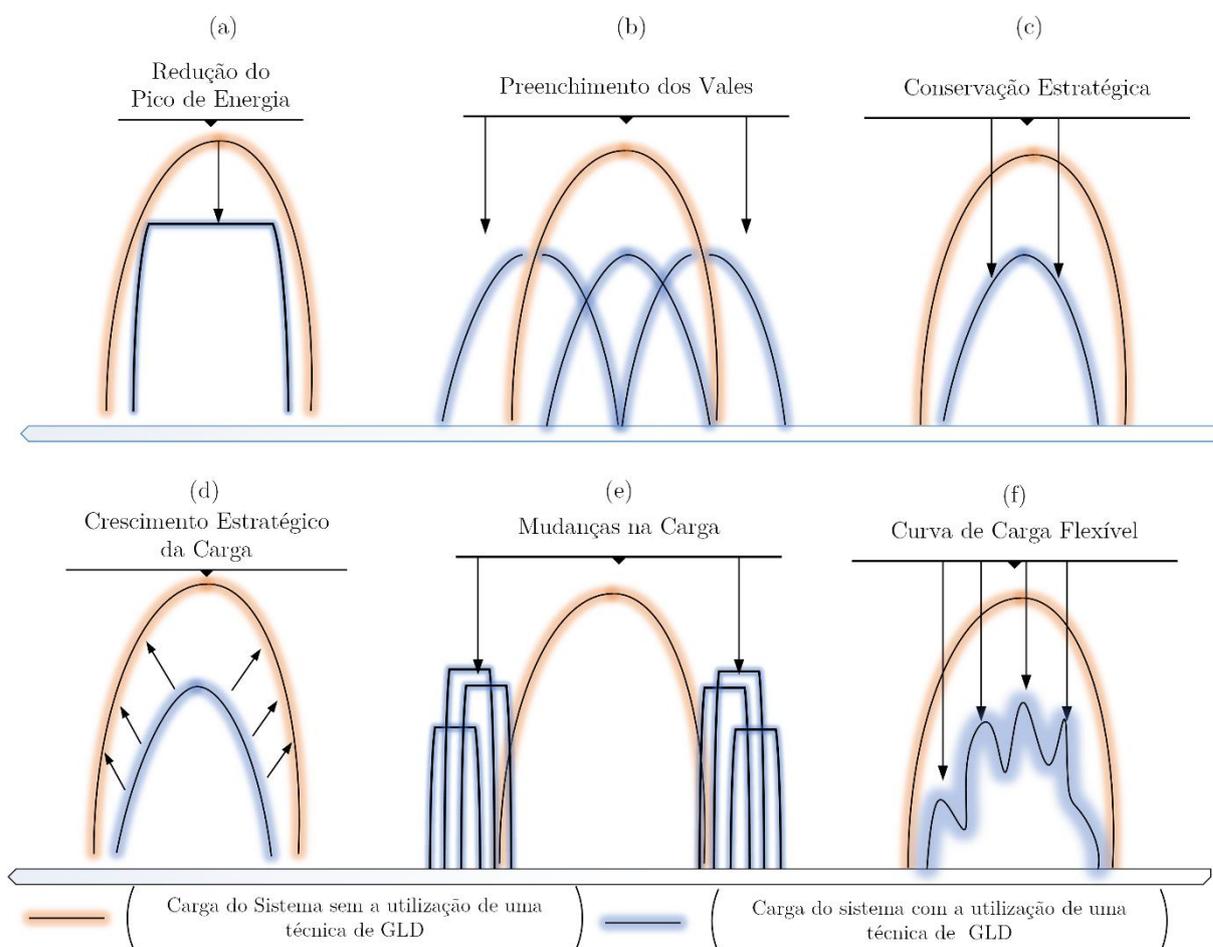
A Gestão pelo Lado da Demanda (GLD) refere-se a uma técnica, ou conjunto de estratégias, iniciadas pela concessionária, pelos clientes finais, ou ambos, a fim de reduzir o nível do consumo de energia dos clientes individuais, diminuindo assim a demanda total do sistema. Essas ações se tornam emergenciais durante as horas de pico do consumo de energia na rede, quando o sistema chega perto da capacidade de geração máxima.

Tradicionalmente, a GLD é abordada sob a perspectiva do Gerenciamento de Carga (GC). O gerenciamento de carga do sistema é uma abordagem inovadora que objetiva-se em promover a administração do consumo sob a ótica da demanda de energia, por meio de programas efetivos que reduzem os desperdícios e alteram o padrão de consumo durante os horários de pico de energia. As estratégias de GC se distinguem em seis categorias (GELLINGS, 2009; TOLEDO *et al*, 2012; KAGAN *et al*, 2013; MCTI, 2015) :

- ✓ **Rebaixamento de pico**, do inglês *peak clipping* - pode ser definido como a redução da carga de ponta, conseguido geralmente através do controle direto. Muitas empresas consideram esta opção apenas para momentos absolutamente críticos de pico no sistema. A Figura 17.a indica essa técnica apresentando a carga do sistema com um pico e em seguida a carga esperada com a aplicação de GLD;
- ✓ **Preenchimento de vales**, do inglês *Valley Filling* - é a segunda forma clássica de gerenciamento da carga. Deseja-se preencher os vales existentes fora do horário de pico. Isto pode ser particularmente interessante naqueles períodos do ano em que o custo marginal supera o custo médio. A Figura 17.b indica essa técnica apresentando a carga do sistema e em seguida curvas menores que reduzem o aparecimento dos vales.

- ✓ **Conservação Estratégica**, do inglês *Strategic Conservation* - é o resultado da substituição de equipamentos por similares mais eficientes, tendo em vista uma redução geral da demanda em toda a curva de carga. A Figura 17.c indica esse procedimento;
- ✓ **Crescimento Estratégico da Carga**, do inglês *Strategic Load Growth* - é um crescimento estratégico de venda de energia utilizado com o objetivo de estimular o desenvolvimento de outra fonte, ou mecanismo auxiliar, diferente do sistema tradicional. Este crescimento pode ocorrer, por exemplo, através de incentivos para a substituição de óleo combustível por eletricidade em caldeiras industriais. Para um futuro não distante, através de novas tecnologias (como veículos elétricos), a tendência é o crescimento geral da carga em pontos específicos. A Figura 17.d mostra esta técnica;
- ✓ **Deslocamento de Carga**, do inglês *Load Shifting* - nessa técnica GC ocorre o deslocamento da carga do horário de pico para o horário fora do pico. É realizado através de programas de tarifas diferenciadas, horário de verão e campanhas de conscientização. A Figura 17.e indica esse procedimento;
- ✓ **Curva de Carga Flexível**, do inglês *Flexible Load Shape* - é um conceito relacionado à confiabilidade. No planejamento futuro, que deve englobar o estudo da oferta e da demanda, a carga poderá ser flexível se forem dadas aos consumidores opções de qualidade do serviço, que variam conforme o preço. Este programa envolve carga interruptível, gerenciamento integrado da energia e aparelhos individuais de controle. A Figura 17.f indica esse procedimento de deslocamento da curva de demanda para uma curva com carga flexível.

Figura 17 - Técnicas de gerenciamento de carga



Fonte: Adaptado de Gellings (2009)

Portanto, a efetividade de ações de gestão pelo lado da demanda está sendo, cada vez mais, impulsionada pelas REIs, através de seus sistemas automáticos de controle e supervisão de redes de distribuição, da geração de energia (local ou distribuída), da automação residencial e de novas soluções de tecnologia da informação, desenvolvimento de novas tecnologias como os veículos elétricos, aplicações remotas e outros dispositivos que estão mudando a mudando a forma como os sistemas elétricos são abordados.

2.3.2 Bases para Implementação das Redes Elétricas Inteligentes.

Vários desafios para a concretização da arquitetura técnica de uma REI. O primeiro grande desafio é desenvolver aplicações que atendam a vasta natureza geográfica e volumosa de consumidores em áreas urbanas em grandes metrópoles, periferias e áreas rurais, garantindo os padrões de qualidades, recursos e restrições operacionais, da implementação das REIs (MCTI, 2015).

Outro grande desafio está na padronização do envio de dados, periodicidade, quantidade e nível de detalhamento de cada instancia em questão, para isso, aspecto da arquitetura deve ser descrito de maneira consistente, detalhada e coesa. Portanto, se faz necessário diferenciar os vários instrumentos, equipamentos e questões regulatórias que compõem a implementação de uma REI (TOLEDO *et al*, 2012).

2.3.2.1 Infraestrutura de Medição

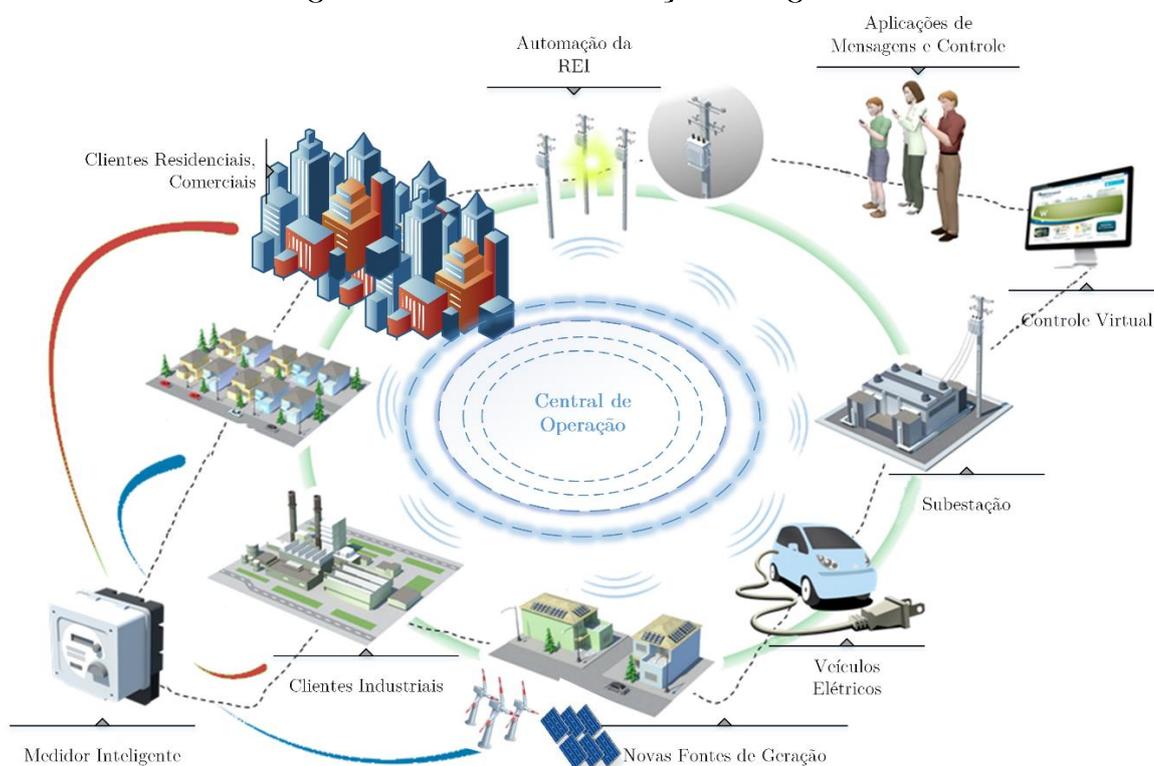
No conceito de redes inteligentes, a relevância dos sistemas de medição tende a evoluir muito. O relacionamento e as funcionalidades do medidor com outros processos podem apresentar diversos níveis de sofisticação, requerendo infraestrutura adequada para realização de sua potencialidade. Particularmente, a medição de consumo nos diversos horários do dia, possibilitando o privilégio da tarifa fora de ponta e penalizando o consumo durante a ponta (CGEE, 2012).

Assim, um medidor eficiente para REIs consiste em um conjunto de componentes com várias funcionalidades que, além de medir o consumo e a demanda de energia, pode fazê-lo em vários momentos do ciclo diário de carga, armazenar e transmitir dados às outras unidades da empresa responsável pelo serviço ou ao cliente por meio de um *display* local ou dentro de sua residência. Esse medidor deve, ainda, transmitir mensagens e contratos bidirecionais, produzir alarmes em caso de falha ou fraudes; efetuar operações

de corte/religa; cadastrar datas e períodos de faltas de energia, com a finalidade de manter controle sobre essas aplicações; desligar circuitos parciais do cliente, conforme seja seu contrato de energia interruptível; ser capaz de aferir todas as métricas necessárias para garantir o funcionamento correto de outras unidades de geração em paralelo ao sistema principal. Esse conjunto de componentes, que possui um medidor central é denominada Medição Inteligente (MI) (KAGAN *et al*, 2013; LOPEZ *et al*, 2015).

A estrutura do sistema de MI em uma rede inteligente abrange, além do medidor inteligente, um centro de controle, que é constituído de uma estrutura física e lógica capaz de receber, processar, armazenar e gerir os dados e informações de medição, que em seguida podem ser repassados para outros sistemas corporativos dedicados ao faturamento e ao planejamento e controle operacional. A Figura 18 mostra a posição da MI frente a utilização das redes inteligentes (BERGER e INIEWSKI, 2015).

Figura 18 - Sistema de Medição Inteligente



Fonte: Elaboração Própria.

Apesar da arquitetura do sistema de MI ser tão complexa a camada de aplicação visível pelo cliente deve ser simples o suficiente para o usuário entender as informações e

fazer o bom uso delas. A penetração desses medidores está diretamente ligada com os requisitos necessários para a garantia dos dispositivos de automação e geração distribuída incorporados as microrredes. Adicionalmente, esses sistemas devem tratar questões de interoperabilidade e intercambialidade dos dispositivos e fabricados por empresas diferentes para a realização de tarefas semelhantes, ao passo que se essas questões não forem tratadas devidamente, não será possível a adequação dos sistemas de TI e telecomunicação. Fica evidente que, os sistemas de MI desempenham um papel fundamental no desenvolvimento das REIs, constituindo uma das bases mais importantes na fixação desse novo conceito da utilização de REIs.

2.3.2.2 Inteligência em Sistemas de Energia

A grande motivação e benefício para os sistemas de energia ao executarem inteligência é a maior confiabilidade, que, eventualmente, também leva melhorias no funcionamento geral do sistema e na eficiência. A automação dos dispositivos de comutação, tais como religadores, interruptores e disjuntores, incluindo a instalação de dispositivos de comunicação de longo alcance nos locais remotos, favorece o mais rápido isolamento de falhas e a restauração do serviço de energia à clientes não afetados diretamente pela falha (BERGER e INIEWSKI, 2015).

Assim, a utilização de inteligência (proteção, controle, algoritmos de otimização), como solução adequada de problemas críticos em operação, controle e otimização de sistemas de energia elétrica, relaciona os sistemas de hardwares com os de softwares. A *National Electrical Manufacturers Association* - NEMA apresentou uma definição dos níveis de inteligência aplicados a cadeia de suprimentos de energia elétrica (NEMA, 2009). Os níveis de inteligência variam de 0 até 5, onde os agentes da cadeia de suprimentos de energia elétrica compartilham informações do tipo “oferta-e-demanda” ao longo de, por exemplo, todo um continente. A Tabela 1 abaixo indica os seis níveis de inteligência propostos por NEMA (2009):

Nível	Situação	Descrição
0	Operação Manual	Nenhuma observação e nenhum controle. Cada nó da rede desconhece seu próprio estado operacional, sendo que todo o monitoramento, controle e atuação são realizados por agentes externos. Logo, qualquer sinalização que requeira a presença direta de um ser humano para interpretar coisas como, por exemplo, indicadores de posição, luzes ou sinal audível, induz a uma classificação de nível zero de inteligência. Da mesma forma, qualquer alavanca ou chave que requeira contato humano direto para atuação também induz a uma classificação de nível zero de inteligência.
1	Comunicação Eletrônica Digital	Comunicação unidirecional relatório de status e bidirecional (relatório de status e atuação remota). Cada nó tem consciência de seu estado <i>local state awareness</i> com capacidade de envio de relatório e/ou atuação remota. A habilidade de sinalizar/transmitir além dos limites físicos do equipamento é considerada Nível 1 de inteligência. Os relatórios devem estar aptos a serem transmitidos, através de comunicação eletrônica digital, para outro equipamento. Se o equipamento estiver diretamente conectado ao nó da rede em questão, ou a mensagem for repassada a uma sala de controle em uma localização remota, a transmissão ou recepção de alguma forma de informação induzirá a uma classificação de Nível 1 de inteligência.

Tabela 01 - Níveis de Inteligência (Continuação)

Nível	Situação	Descrição
2	Atuação Autônoma, Automação Básica	Este é o primeiro nível no qual o controle automático local é possível. Medidas locais são utilizadas para que o equipamento, ou nó da rede, atue por si próprio, de forma autônoma. Controladores simples de malha fechada são exemplos de equipamentos com inteligência de Nível 2
3	Otimização Autônoma, Comportamento Adaptativo	Além da simples atuação autônoma, os equipamentos, ou nós da rede, têm consciência de alguns estados operacionais e atuam, a fim de ajustar seu desempenho com relação àquele estado. Os equipamentos ou nós desse nível se caracterizam por tomar decisões locais, reconfigurando a si mesmos para assumir seus parâmetros de desempenho de boa qualidade
4	Colaboração	Além da otimização autônoma, o escopo de inteligência do Nível 4 envolve múltiplos equipamentos ou nós atuando de forma conjunta, a fim de obter um estado desejado para o sistema. Uma função chave em termos de interoperabilidade nesse nível é uma estrutura semântica comum.
5	Desenvolvimento de Previsão e Planejamento	Além da interoperabilidade, alguma forma de análise automatizada deve ocorrer para atingir a inteligência de Nível 5, de modo que o próprio sistema gere metas operacionais e de planejamentos para aprimoramento no desempenho global da cadeia de suprimentos de energia elétrica. Isso inclui qualquer tecnologia de controle avançado, como equipamentos e algoritmos para análise

Nível	Situação	Descrição
5	Desenvolvimento de Previsão e Planejamento	diagnóstico, predição, e atuação para que as ações corretivas apropriadas sejam realizadas, a fim de eliminar, mitigar e prevenir interrupções de fornecimento e distúrbios de qualidade de energia. O gerenciamento de recursos, tempo, e variáveis externas ao sistema, como aquelas que influenciam fontes de energia provenientes de recursos renováveis, são características de inteligência de Nível 5.

Fonte: Baseada em NEMA (2009)

A implantação de cargas sensíveis a demanda, recursos de geração distribuída, microrredes e inteligência nas redes de energia se tornaram grandes passos para o desenvolvimento de redes elétricas sustentáveis. Em paralelo, a atuação das redes elétricas inteligentes está diretamente interligada a especificação de equipamentos que atuam nas áreas de proteção, monitoramento, controle e medição. Os Registradores digitais de falhas *Digital Fault Recorder - DFR* são utilizados para registrar variados tipos de eventos de falha capturados em sistemas de energia. Tais informações permitem identificar, em análise posterior dos dados, as possíveis razões para a atuação de relés de proteção e disjuntores. (BANDEIRA, 2012; ONWUNTA e KAHN, 2014; LOPEZ *et al*, 2015).

Com o desenvolvimento de tecnologias presentes nas redes inteligentes, estão surgindo oportunidades que viabilizam a solução dos problemas de reconfiguração em REIs. Entre essas tecnologias pode-se dar destaque aos medidores inteligentes, ao controle automatizado de suprimento de energia, aos equipamentos eletrônicos inteligentes em geral e as técnicas de inteligência computacional (MATHIAS NETO, 2010; BOTEVA *et al*, 2012; MARQUES *et al*, 2013; MORAIS *et al*, 2014).

Adicionalmente, a operação de reconfiguração busca isolar uma área com problemas, ao mesmo tempo em que a quantidade de cargas não supridas é minimizada.

Ou seja, a metodologia de reconfiguração de energia almeja o equilíbrio de potência com o menor percentual de rejeição de carga. Com base nessas novas tecnologias e nos princípios de funcionamento, após uma falha, algumas ações de controle podem ser tomadas para a reconfiguração das redes de energia. Tais ações estão listadas abaixo:

- ✓ Mudar o modo de operação das microrredes envolvidas;
- ✓ Quando necessário, rejeitar cargas de menor prioridade, desconectando-as da rede;
- ✓ Manter a continuidade de atendimento a cargas com maior prioridade através do monitoramento do balanço de potência.

Capítulo 3: Métodos de Otimização

Problemas de otimização consistem em encontrar a melhor combinação dentre um conjunto de variáveis que permita maximizar ou minimizar uma função, denominada função objetivo ou função custo. Esses problemas podem ser divididos em três categorias: aqueles cujas variáveis assumem valores reais (ou contínuos), aqueles cujas variáveis assumem valores discretos (ou inteiros) e aqueles em que há variáveis inteiras e contínuas, classificados, respectivamente, como problemas de Otimização Contínua, Otimização Combinatória ou Discreta, e Otimização Mista (PIZZOLATO e GANDOLPHO, 2013; SOUZA, 2014; ANDRADADE, 2015).

Em paralelo, um algoritmo é um processo sistemático para a resolução de um problema. Podem-se classificar os algoritmos de diversos modos, alguns deles, estão definidos a seguir. Os algoritmos exatos garantem encontrar uma solução ótima para qualquer instância de um problema de otimização. Também é possível classificar os algoritmos em determinísticos e não determinísticos. Os Algoritmos determinísticos são aqueles em que, sempre que a entrada do problema for repetida, o resultado produzido será o mesmo. Já os algoritmos não determinísticos ou probabilísticos, podem, diante de uma mesma entrada do problema, produzir resultados diferentes, pois consideram, no seu processamento, algum evento pseudo-aleatório (DA LUZ *et al*, 2008)

Uma técnica frequentemente empregada auxiliar na confecção de um algoritmo que permita resolver problemas de otimização é o uso de regras simples, geralmente associadas ao conhecimento específico do problema que se quer resolver. Essas regras são chamadas de estratégias heurísticas e descrevem uma abordagem simplificada para um problema até então de difícil solução (SILVER *et al*, 1980).

3.1 Heurísticas e Metaheurísticas

Algoritmos heurísticos (ou simplesmente heurísticas) de otimização são métodos que obtêm soluções aproximadas para problemas de otimização. O desenvolvimento de heurísticas surge em resposta à impossibilidade de se resolver satisfatoriamente diversos problemas de otimização NP-difíceis (ARROYO, 2002; ROMERO *et al*, 2005; CARRANO *et al*, 2014).

Os métodos heurísticos visam encontrar uma solução, não necessariamente a melhor, em um tempo computacional aceitável. São aplicados quando a obtenção da solução ótima de um problema é computacionalmente dispendiosa quando realizada utilizando-se métodos exatos. Existem muitos fatores que tornam interessante a utilização de algoritmos heurísticos na resolução de um determinado problema (FRANCO *et al*, 2012; MARQUES, 2013):

- ✓ Inexistência de um método exato que permite resolver o problema analisado;
- ✓ Quando a solução de um problema demanda por tempo de processamento muito alto;
- ✓ Quando a solução ótima é desnecessária, pois as soluções obtidas já são satisfatórias;
- ✓ Quando limitações de tempo e/ou recursos determinem a utilização de métodos de resposta rápida;
- ✓ Como passos intermediários de outros algoritmos, potencialmente exatos ou heurísticos.

Nas últimas décadas, os métodos heurísticos, tradicionais, foram sendo modernizados e se particularizando quanto as diversas aplicações, como também apareceram propostas que se complementam. Assim, como forma de potencializar o desempenho do espaço de soluções de um problema, o processo de busca passou a ser guiado pelas metaheurísticas.

As metaheurísticas, ou heurísticas modernas, apresentam bastante flexibilidade quanto a formulação e codificação de problemas, atendendo a restrições muito específicas, sob diferentes abordagens do contexto de aplicação. São técnicas heurísticas mais robustas, que resolvem um problema de otimização procurando, a cada iteração, o elemento constituinte da solução que mais reduz o custo total naquele momento. A busca se encerra quando todos os elementos da solução tiverem sido calculados. Assim, uma metaheurística pode ser vista como uma ferramenta algorítmica geral que pode ser aplicada a diferentes problemas de otimização, com modificações relativamente pequenas para torná-la adaptável a um problema (AZEVEDO, 2010; BOTEVA *et al*, 2012; CAMILLO *et al*, 2016).

As metaheurísticas são conceitualmente genéricas e usuais para os mais variados tipos de problemas, por isso desenvolver uma meta-heurística para resolução de um dado problema exige do desenvolvedor (projetista) um alto nível de conhecimento sobre o problema de modo a torná-la especializada: a codificação adotada para incorporação do problema, os parâmetros utilizados para representá-lo e os procedimentos de melhoria local devem ser baseados no conhecimento de domínio específico do problema a ser modelado e posteriormente resolvido (SOUZA, 2014).

Em seguida, serão abordadas algumas estratégias heurísticas que se destacam na literatura pela forma como se adaptam à resolução dos problemas e a qualidade das soluções geradas dadas as restrições do mesmo.

3.1.1 Busca Tabu

A metaheurística Busca Tabu (BT) foi inicialmente desenvolvida por Glover (GLOVER, 1986) como uma proposta de solução para problemas de programação inteira. A partir de então, o autor formalizou esta técnica e publicou uma série de trabalhos contendo diversas aplicações da mesma (GLOVER, 1989, 1990; GLOVER e LAGUNA, 1997, 2013). A metaheurística BT utiliza uma lista contendo o histórico da evolução do processo de busca, de modo a evitar ciclagem; incorpora uma estratégia de balanceamento

entre os movimentos aceitos, rejeitados e aspirados; e adota procedimentos de diversificação e intensificação para o processo de busca.

A cada iteração, a solução atual (S) muda para outra que seja sua vizinha no espaço de busca (S'). Partindo de uma solução inicial S_0 , um algoritmo BT explora, a cada iteração, um subconjunto V da vizinhança $N(S)$ da solução corrente S . O membro S' de V com melhor valor nessa região segundo uma função de avaliação, $f(\cdot)$, torna-se a nova solução corrente mesmo que S' seja pior que S isto é, que $f(S') > f(S)$ para um problema de minimização.

A proibição de determinados movimentos tem a intenção de impedir que a solução retorne ao ponto de mínimo local nas T iterações seguintes. O não veto de determinados movimentos pode fazer com que o algoritmo entre em *loop*. Um artifício criado com o intuito de não “autorizar” a ocorrência destes movimentos é a Lista Tabu. Esta possui uma lista de tamanho t contendo as soluções visitadas durante as últimas T iterações sequenciadas na forma FIFO (*First In First Out*). Abaixo estão listados os procedimentos para a realização da BT.

Algoritmo Busca Tabu

1. Gerar solução Inicial
 2. Repetir
 - (a) Gerar a vizinhança
 - (b) Avaliar a vizinhança
 - (c) Determinar a melhor solução
 - (d) Atualizar a lista tabu
 - (e) Intensificar e Diversificar
 - (f) Até que o critério de parada seja atendido
 - 3 Fim
-

O processo intensificação, apresentado no algoritmo Busca Tabu, baseia-se na modificação de regras para incentivar soluções com características historicamente boas. Essa alteração pode ser utilizada para retornar a regiões atraentes fazendo uma busca mais profunda nesta região. Já o processo de diversificação, estimula a gerar soluções que se diferem das encontradas na busca anterior. Ela é geralmente utilizada em determinadas situações como, por exemplo, uma solução não tem um vizinho que apresente melhoria, neste caso é aplicada uma penalidade a esta solução (GARCIA, 2005).

Uma alternativa à BT tradicional é o Algoritmo Busca Tabu Reativa - BTR acrescenta mais robustez ao processo com uma ferramenta chamada *reactive* para adaptar a dimensão da lista ao problema sob análise. O algoritmo é incrementado com o mecanismo *reactive* que aumenta rapidamente o tamanho da lista tabu quando as configurações estão se repetindo. Isto é acompanhado por um mecanismo de redução lento, de forma que o tamanho da lista é reduzido, se durante um longo período não ocorrerem repetições (ROMERO, 2009).

A estrutura de memória da LT tem como base quatro principais conceitos, formados por recência, frequência, qualidade e influência. A memória de recência tem como principal objetivo evitar ciclos, mantendo registrados por um determinado tempo os atributos dos caminhos tomados pelo algoritmo. Já considerando o aspecto de frequência, a memória armazena a frequência que determinadas características aparecem na solução, auxiliando o algoritmo a evitar ou visitar caminhos que apresentem estas características. A qualidade da solução se torna uma base para a aprendizagem baseada em incentivos, onde os incentivos são fornecidos para ações que levam a boas soluções, enquanto ações que levam a soluções ruins são penalizadas. A influência considera o impacto das escolhas realizadas durante a busca, tanto na qualidade quanto na estrutura (SEDANO, 2005).

O critério de parada da Busca Tabu, assim como em outras metaheurísticas, pode ser a partir de um número fixo de iterações, um número fixo de iterações sem

melhoria da solução, depois de uma quantidade de tempo da CPU ou quando alcançado um limite pré-estabelecido de qualidade da solução. A definição do tamanho da lista tabu, quantidade de iterações e a condição da parada do algoritmo, influenciam na eficiência final do algoritmo implementado (SILVA *et al*; 2004; PEREIRA JUNIOR, 2012; GLOVER e LAGUNA, 2013).

3.1.2 Colônia de Formigas

As formigas são insetos sociais que possuem um sistema complexo de organização e divisão de tarefas, cuja principal função é garantir a sobrevivência do formigueiro. Chama atenção a complexidade das tarefas executadas pelo formigueiro quando comparada com a simplicidade de cada formiga individualmente (BABA *et al*, 2004).

A meta-heurística da colônia de formigas, do inglês, *Ant Colony Optimization* (ACO), proposta por Dorigo e Caro (1999), foi inspirada na observação das colônias de formigas reais, em particular em como elas encontram o menor caminho entre a fonte de alimentos e o formigueiro. Para a obtenção do alimento para o formigueiro, a colônia resolve um interessante problema de otimização.

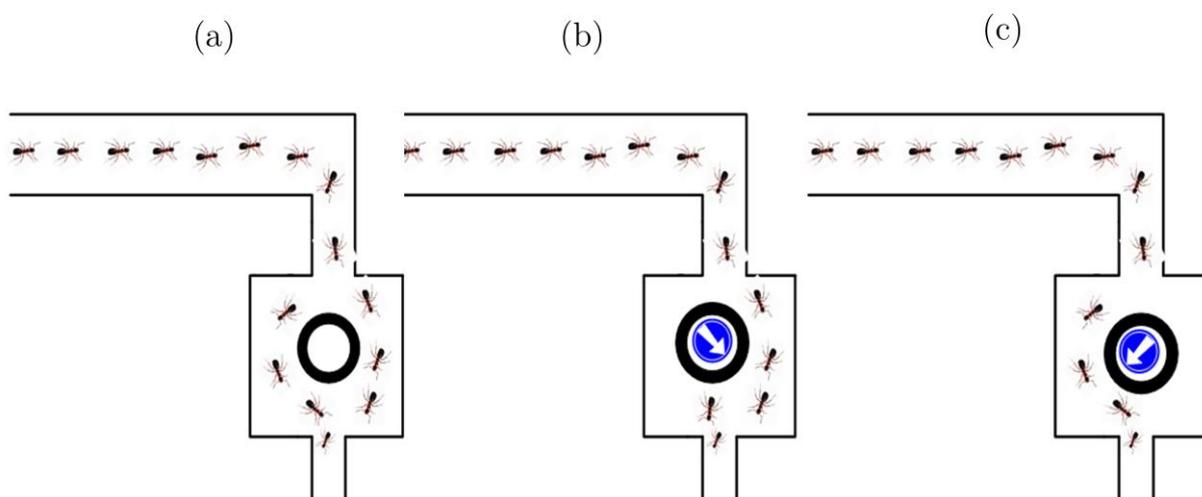
Inicialmente, as formigas percorrem de modo aleatório a região próxima ao formigueiro em busca do alimento. Cada formiga, enquanto percorre o seu caminho, deposita sobre o solo uma substância chamada feromônio, formando um caminho ou rastro de feromônio. As formigas subsequentes detectam a presença desta substância e tendem a escolher o caminho marcado com a maior concentração de feromônio. O feromônio portanto, além de possibilitar a formação de um caminho de volta para a formiga, também tem a função de informar as outras formigas sobre quais os melhores caminhos até o alimento. Depois de algum tempo, os caminhos mais eficientes – ou de menor distância percorrida até o alimento – acumulam uma quantidade maior de feromônio. Inversamente, os caminhos menos eficientes – ou de maior distância percorrida até o alimento – apresentam uma pequena concentração de feromônio, devido ao menor

número de formigas que passaram por ele e ao processo de evaporação natural do feromônio (MONTEMANNI *et al*, 2003).

A meta-heurística de otimização de colônia de formigas, quando aplicada a um problema, inicia-se com cada formiga construindo uma solução a partir de um dos nós da rede do problema. Cada formiga k constrói o seu caminho movendo-se através de uma sequência de locais vizinhos, onde os movimentos são selecionados segundo uma distribuição de probabilidades, e posteriormente o menor caminho encontrado será aquele com a maior distribuição de probabilidades.

No início as formigas são deixadas livres para escolher o caminho, não há feromônio ainda como indicado na Figura 19(a). As formigas convergem para um dos caminhos com igual prioridade, pois devido a flutuações aleatórias, uma das pontes terá mais feromônio e atrairá as formigas com maior probabilidade como indicado nas Figuras 19(b) e 19(c).

Figura 19 - Caminhos da Colônia de Formigas



Fonte: Elaboração Própria.

A probabilidade de uma formiga visitar uma determinada região é influenciada pela quantidade de feromônio que está presente no caminho e a distância entre as cidades. Estes dois valores também são influenciados por dois parâmetros do ACO, chamados de

α e β , que indicam respectivamente a influência do feromônio e a influência da distância percorrida por cada formiga (DORIGO e SOCHA, 2007).

3.1.3 Algoritmo Genético

Os algoritmos genéticos (AGs) foram desenvolvidos pelo americano John Henry Holland na Universidade de Michigan na década de 60. Ele desenvolveu simulações computacionais que retinham os mecanismos originais encontrados em sistemas evolutivos naturais baseados na teoria evolutiva de Darwin (1859), ou seja, utilizar os conceitos da evolução biológica, tais como genes, cromossomos, cruzamento, mutação e seleção, em outros problemas de otimização através de algoritmos computacionais (SILVA, 2014). O funcionamento correto de um AG dependerá, basicamente, de duas condições iniciais (ALVARENGA e PETROLI NETO, 2012):

- ✓ **Codificação do Cromossomo** – Os cromossomos podem ser codificados através de uma cadeia de bits ou por números inteiros. No que diz respeito à codificação do cromossomo, deve-se ter em mente que o mesmo deverá possuir genes (material genético que poderá ser trocado entre os cromossomos na reprodução). Assim, um gene nada mais será que uma divisão do cromossomo, ou seja, o cromossomo criado deverá ter a propriedade de conseguir ser dividido em partes. É nesse sentido que entra a cadeia de bits, na qual cada bit é um gene e o conjunto é o cromossomo;
- ✓ **Função de Avaliação** – Após a criação dos cromossomos é possível que os mesmos se reproduzam, criando novos cromossomos formados a partir da troca genética de seus pais. A função de avaliação possui o objetivo de determinar quais são os cromossomos que devem continuar a se reproduzir e quais devem ser eliminados. Ela faz a ligação do algoritmo com o problema real. A função de avaliação deverá ser capaz de analisar qual cromossomo possui melhores características para continuar. Fazendo uma analogia com a natureza, seria o ambiente onde os seres vivos encontram-se inseridos e para o qual necessitam se adaptar. Ao fim, a função

de avaliação determina a condição de parada na reprodução dos cromossomos, os quais representam as soluções para os problemas reais avaliados.

O algoritmo foi proposto por Holland (1992) e consistem em visão simplista do funcionamento do mesmo, mas que pode ser empregada com bastante sucesso. Um AG pode ser escrito da seguinte forma:

Algoritmo Genético

1. *População inicial com tamanho N composta por indivíduos aleatórios;*
 2. *Aplicação da função de avaliação em cada um desses cromossomos, obtendo uma classificação dos mais adaptados ao problema;*
 3. *Cruzamento destes cromossomos, levando-se em consideração que os mais adaptados devem ter maiores chances de reprodução. Esse procedimento poderá gerar novos cromossomos;*
 4. *Mutação de parte da porcentagem dos cromossomos criados, podendo proporcionar o aparecimento de surpresas positivas;*
 5. *Eliminação dos cromossomos da população antiga, assim, novos cromossomos gerados possam ser inseridos sem alterar o tamanho da população inicial;*
 6. *Aplicação da função de avaliação inserindo os melhores cromossomos selecionados na população anterior, gerando uma nova população;*
 7. *Por fim, se a população de cromossomos atual representar o resultado esperado ou se a quantidade de gerações máxima definida foi atingida, pare. Caso contrário, volte à etapa de cruzamento dos cromossomos (etapa 3). O tamanho N , da população inicial, é uma variável do algoritmo e seu valor depende da complexidade do problema.*
-

Ao final do algoritmo acima se espera que a população de cromossomos gerada seja a melhor adaptada à função de avaliação, sendo dessa forma, a que melhor represente o resultado do problema. Analisando o algoritmo, consegue-se perceber a importância de

uma boa codificação para o cromossomo e de uma função de avaliação que, efetivamente, seja capaz de classificar os cromossomos em melhores e piores. Essa tarefa inicial de geração do cromossomo e da função de avaliação não é uma tarefa fácil, uma vez que, para que a mesma produza bons frutos, precisa-se conhecer muito bem a estrutura do problema a ser resolvido (CAMILLO *et al*, 2014).

3.1.4 Busca de Vizinhança Variável

A Metaheurística de Busca de Vizinhança Variável do inglês, *Variable Neighborhood Search* (VNS), foi proposta por Mladenovic e Hansen (1997). A idéia é uma mudança sistemática de vizinhança dentro de uma busca local. A Metaheurística VNS possui um mecanismo de perturbação na solução corrente, utilizando diferentes estruturas de vizinhança. Esse mecanismo de perturbação pode ser aplicado durante a fase de descida e na fase de exploração permitindo uma piora na qualidade da solução corrente. Após o processo de perturbação da solução é executado um movimento de busca local que busca através do mecanismo de intensificação se aproximar de ótimos locais. Sempre que o mecanismo de intensificação não conseguir melhorar a solução corrente, altera-se o mecanismo de perturbação utilizando outra estrutura de vizinhança (DUTRA e MONTANÉ, 2009).

Em seguida será apresentado um pseudocódigo do algoritmo VNS. Esse método explora a partir de uma solução inicial (s), o espaço de soluções vizinhas através de trocas sistemáticas dos componentes, representadas por $N_k(s)$, onde $k = 1, 2, \dots, N$. Sendo que N indica o número total dos componentes de vizinhanças e *FunçãoAv* uma função de avaliação do problema.

Algoritmo Busca de Vizinhança Variável

1. Receber Valores de s e Número Máximo de Iterações (NMI)

```

2.  $S^* \leftarrow S$ 
3.  $FunçãoAv(s^*) \leftarrow FunçãoAv(s); i \leftarrow 0;$ 
4. Enquanto ( $i \leq$  Número Máximo de Iterações) Faça
    4.1  $s' \leftarrow$  Gerar randomicamente  $s' \in N_k(s);$ 
    4.2  $k \leftarrow 1;$ 
    4.3 Enquanto ( $k \leq N$ ) Faça
        4.4  $s'' \leftarrow$  Explorar  $N_k(s');$ 
        4.5 Se ( $FunçãoAv(s'') \leq FunçãoAv(s)$ ) Então
            4.6  $s \leftarrow s''; k \leftarrow 1;$ 
        4.7 Senão
            4.8  $k \leftarrow k+1;$ 
        4.9 Fim Se
    4.10 Fim enquanto
    4.11 Se ( $FunçãoAv(s) \leq FunçãoAv(s^*)$ ) Então
        4.12  $s^* \leftarrow s;$ 
    4.13 Fim Se
    4.14  $i \leftarrow i + 1;$ 
5. Fim Enquanto
6. Retorne  $s$ 
7. Fim Algoritmo

```

Adicionalmente, os autores do VNS, Mladenovic e Hansen (1997), desenvolveram um procedimento de busca local de Descida em Vizinhança Variável, do inglês Variable Neighborhood Descent (VND). Tal método consiste na alteração dos subitens, 4.1 ao 4.10, destacados no Algoritmo Busca de Vizinhança Variável.

A principal diferença entre os dois métodos está no fato de que o VND cessa a procura de soluções quando for atingida a última estrutura de vizinhança e nenhuma melhora na solução corrente for possível, enquanto que o método VNS tem condições de

Algoritmo de Descida em Vizinhança Variável

- 1 Receber o valor de s
- 2 $s^* \leftarrow s$; $k \leftarrow 1$;
- 3 Enquanto ($k \leq N$) Faça
 - 3.1 $s' \leftarrow$ Melhor Solução Explorar $\in N_k(s^*)$;
 - 3.2 Se ($FunçãoAv(s') \leq FunçãoAv(s^*)$) Então
 - 3.3 $s^* \leftarrow s'$; $k \leftarrow 1$;
 - 3.4 Senão
 - 3.5 $k \leftarrow k+1$;
 - 3.6 Fim Se
- 4 Fim Enquanto
- 5 Fim Algoritmo

prosseguir a busca quando essa última situação ocorre, uma vez que retorna-se à primeira estrutura de vizinhança e seleciona-se um outro vizinho qualquer até que uma determinada condição de parada seja satisfeita (MACIEL *et al*, 2005).

Portanto, o algoritmo VNS é composto por duas fases, a fase de construção e a fase de busca local, porém se diferencia das demais metaheurísticas encontradas na literatura, pois, não segue uma trajetória, mas explora gradativamente diferentes mecanismos de busca local através de trocas sistemáticas de vizinhanças. A ideia por detrás deste método é explorar uma vizinhança ao máximo enquanto resultados satisfatórios forem sendo obtidos.

3.1.5 Metaheurística GRASP

A metaheurística *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP) foi proposta por Feo e Resende (1995), e pode ser utilizada para a obtenção de soluções dos problemas de otimização em geral. Esta metaheurística é dividida em duas fases principais: a fase construtiva, que é baseada em um Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC), responsável por gerar uma solução, elemento a elemento; e a fase de melhoria local, na qual um ótimo local, na vizinhança da solução construída, é pesquisado. A melhor solução encontrada ao longo de todas as iterações GRASP é retornada como uma possível solução para o problema.

Na primeira fase do GRASP, fase de construção, deve ser utilizada uma heurística construtiva parcialmente gulosa. Basicamente, a diferença entre a heurística gulosa e a heurística parcialmente gulosa, é que nas heurísticas gulosas sempre escolhe o melhor elemento (aquele que minimiza ou maximiza a função de avaliação) para compor a solução. Já na heurística parcialmente gulosa, a escolha do seguinte elemento é realizada de forma aleatória dentre aqueles que compõem uma lista restrita dos melhores elementos candidatos (LRC). A construção parcialmente gulosa é, portanto, caracterizada pela escolha aleatória de um dos melhores candidatos da LRC, enquanto a construção gulosa é caracterizada pela escolha do melhor elemento (PEREIRA *et al*, 2014).

Na fase de melhoria local é utilizado um algoritmo de busca local com o objetivo de procurar na vizinhança da solução fornecida pela fase construtiva, uma melhor solução para o problema. O GRASP pode contar ainda com uma fase de pré-processamento na qual, as informações sobre o problema são pré-processadas e avaliadas com o objetivo de diminuir o espaço de busca do problema caso seja possível (SOUZA *et al*, 2012, 2013). A seguir apresentam-se os passos do algoritmo GRASP apresentados por SOUZA (2013) para um problema de otimização:

Algoritmo da GRASP

0. Ler os dados de entrada do problema a ser analisado.
 1. Montar um conjunto solução inicial que pode ser vazio ou não. Essa solução se transformará na solução corrente;
 2. Elaborar uma Lista Restrita de Candidatos (LRC) com k componentes ou variáveis mais atraentes, utilizando um indicador de sensibilidade;
 3. Escolher aleatoriamente uma variável da lista construída no 2º Passo e atualizar o conjunto solução adicionando a variável escolhida;
 4. Se o critério de parada for satisfeito, ou seja, encontrou uma proposta de solução, fim da fase construtiva. Caso contrário voltar ao 2º Passo.
 5. **Fim do Algoritmo**
-
-

A Lista restrita de candidatos (LRC), apresentada no algoritmo GRASP, é formada por um subconjunto dos melhores candidatos, isto é, aqueles cuja incorporação à solução parcial corrente resulta nos menores custos incrementais (aspecto guloso do algoritmo). O elemento a ser incorporado à solução parcial é selecionado aleatoriamente dentre aqueles da LRC (aspecto probabilístico do algoritmo). Uma vez que o elemento selecionado foi incorporado à solução parcial, a lista de candidatos é atualizada e os custos incrementais são reavaliados (característica adaptativa do algoritmo) (MACIEL, 2005; PEDREIRA, 2012)

3.1.6 Discussão dos Métodos Heurísticos Apresentados

Outras técnicas heurísticas foram implementadas para a resolução de problemas de restauração e/ou rejeição de cargas das redes elétricas, a *Times Assíncronos*, do inglês *Asynchronous Team*, foi proposta por Souza e Talukdar (1992) com base nas relações com sistemas naturais, como sociedade de insetos e comunidades celulares; a técnica *Path Relinking* (Reconexão por Caminhos) foi proposta por Glover (1996) com o objetivo de explorar trajetórias que conectam soluções de elite, isto é, soluções ótimas ou próximas de ótimas; e a técnica *Simulated Annealing* criado por Kirkpatrick *et al.* (1983) realiza uma busca local de maneira probabilística, adicionalmente, essa técnica fundamenta-se em uma analogia com a termodinâmica, em um processo chamado recozimento físico de sólidos, que simula o resfriamento de um conjunto de átomos aquecidos.

As técnicas heurísticas apresentadas no decorrer deste trabalho já foram utilizadas na representação dos sistemas de distribuição de energia de alguma forma. Após revisão da literatura existente, pode-se afirmar que o uso de metaheurísticas metaheurísticas híbridas podem ser utilizadas com o objetivo de potencializar o espaço de busca de soluções factíveis para um problema (GARCIA, SEDANO, 2005; ZVIETCOVICH, 2006; RIBEIRO *et al.*, 2007; FRANCO *et al.*, GUEDES *et al.*, 2012; MARQUES, ROMANO 2013; MOREIRA, SILVA, 2014, SOUZA e ROMERO, 2015; CAMILLO *et al.*, 2016). Como exemplo, em Fraga *et al.* (2006), foi desenvolvida uma metodologia híbrida entre o Algoritmo baseado na heurística colônia de formigas e a busca tabu, que conduz à convergência e a precisão dos resultados gerados.

A técnica de busca local que mais apresentou destaque foi a utilização do algoritmo VNS, seja por comparação, como no trabalho desenvolvido por Guerra (2011) o qual indica superioridade expressiva dos resultados da aplicação do VNS sobre a técnica de busca Simulated Annealing; ou ainda, por meio da utilização da estratégia VND, como busca local, em sistemas híbridos de algoritmos genéticos (RIBEIRO FILHO, 2007), busca tabu (MARINHO, 2005), GRASP (FREITAS e MONTANÉ, 2008), entre outras. Tais resultados mostram o potencial desta heurística, motivando a utilização da

estratégia VNS na abordagem do problema de reconfiguração de REIs, tratado neste trabalho.

Outro método auxiliar empregado em algumas heurísticas foi o ajuste automático ou reativo de alguns parâmetros importantes no decorrer da técnica, que permite intensificar o espaço de busca final das soluções, não se prendendo a mínimos, em problemas de minimização, ou máximos locais, em problemas de maximização. Como exemplo, em Sedano (2005) foi desenvolvida como solução, para a restauração de redes de distribuição de energia elétrica, o algoritmo Busca Tabu Reativa (BTR) que considera a natureza do problema e suas estratégias, conduzindo a busca para espaços ainda não explorados, através de mecanismos específicos de adaptação de listas e escape, dessa forma foi possível evitar a ocorrência de ciclagem.

A abordagem heurística, independente da técnica utilizada, busca uma solução para um problema de otimização, muitas vezes, utilizando recursos computacionais. Assim, segundo os autores pioneiros no desenvolvimento das heurísticas, para determinar a escolha de um método as seguintes características devem ser ponderadas para atender a um problema específico:

- ✓ Ser simples: um método heurístico geralmente é apresentado de forma genérica para qualquer problema, portanto, seu desenvolvimento deve ser fácil de implementar (DYER e FRIEZE, 1985; LIN e KERNIGHAN, 1973);
- ✓ Ser rápido: o método heurístico deve produzir soluções de alta qualidade mais rápido que outras abordagens (BARR *et al*, 1995);
- ✓ Ser preciso: característica de suma importância para identifica soluções de alta qualidade mais rápido que outras abordagens (AHUJA e ORLIN, 1992);
- ✓ Ser robusto: o método de abordagem deve ser menos sensível a diferenças nas características do problema, qualidade dos dados e refinamento de parâmetros (HOPFIELD e TANK, 1985);

- ✓ Ser confiável: a estratégia escolhida deve provê soluções viáveis e corretas (AHUJA e ORLIN, 1992);
- ✓ De alto impacto: o método escolhido deve resolver um problema novo e importante mais rápido e preciso que outras técnicas (ROTHFARB *et al*, 1970);
- ✓ Ser generalizável: possibilidade de ser aplicado em um grande número de problemas de otimização (FEO e RESENDE, 1995; HOLLAND, 1975)
- ✓ Possuir aplicação prática segundo um modelo teórico: com o método é utilizado para a representação de um problema real, o mesmo, deve incorporar compreensões teóricas, como limites sobre a qualidade da solução final do problema (HELD e KARP, 1970; HOCHBAUM e SHMOYS, 1985; JOHNSON e PAPADIMITRIOU, 1985).

Em concordância com essas características apresentas, uma das metaheurísticas que está ganhando expressivo destaque nos últimos anos é a metaheurística GRASP. Esse método tem apresentado ótimos resultados quando aplicado à solução de problemas complexos e de grande porte (MACIEL, 2005; GUEDES *et al*, 2012; RIBEIRO, 2013, SOUZA, 2014).

Motivado pela ampla utilização encontrada na literatura e na possibilidade de expandir os benefícios de uma metaheurística híbrida, neste trabalho, a abordagem do problema de reconfiguração de REIs será efetuada por um método baseado nos conceitos da metaheurística GRASP e da estratégia de busca VNS.

Capítulo 4: Aspectos da Metodologia Proposta

A pesquisa é caracterizada como um processo formal e sistemático de desenvolvimento do método científico, cujo objetivo fundamental é descobrir resposta para problemas mediante o emprego de procedimentos científicos. Quanto à natureza a pesquisa pode ser classificada como pesquisa aplicada ou prática, pois, busca gerar conhecimentos para aplicação prática e dirigidos à solução de problemas específicos (GIL, 2002).

Os procedimentos metodológicos usados são baseados em uma abordagem qualitativa, de natureza aplicada, com um método científico indutivo e um objeto de estudo explicativo. Relativamente aos procedimentos técnicos de pesquisa, recorreu-se a pesquisa experimental (Gil 2002). O objeto da metodologia do problema consiste na obtenção de um plano de manobras dos disjuntores existentes na rede, que permita executar a reconfiguração de forma rápida dada uma situação de contingência ou manutenção. Para resolução do problema implica: formulação do problema; definição as medidas de desempenho e fatores a serem explorados; definição do modelo heurístico; descrição da modelagem de microrredes como grafos; descrição dos procedimentos para reconfiguração das redes de energia; projeção e execução dos experimentos; e análise dos dados obtidos com a execução das técnicas heurísticas.

Quanto aos procedimentos utilizados na condução dos experimentos com heurísticas recorreu-se a uma análise de algoritmos de forma assintótica e de experimentação; assintótica, pois, os algoritmos implementados podem ser analisados por meio de complexidade de tempo e complexidade de espaço e; de experimentação, pois, a simulação realizada é baseada em experiências, observações e tentativas, que podem ser confirmadas ou rejeitadas através dos resultados obtidos após a confecção da técnica utilizada(COSTA, 2011).

Para isso, foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre conceitos básicos e metodológicos acerca da simulação de sistemas e do campo de abordagem do problema de reconfiguração das REIs, sendo consultados em anais de congressos, resumos, livros e nas bases de dados eletrônicas *ResearchGate*, *Springer*, *Google Scholar*, *Ebsco*, *Scielo*, *Science Direct*, *Scopus*, *Emerald* e o Portal de Periódicos CAPES com objetivo de identificar, sintetizar e avaliar todas as informações disponíveis relevantes a respeito dos métodos heurísticos disponíveis na literatura e, ainda, definir a situação atual do desenvolvimento das redes elétricas inteligentes, dos sistemas de microrredes e as principais fontes de geração distribuída.

4.1 Escopo de Aplicação do Problema

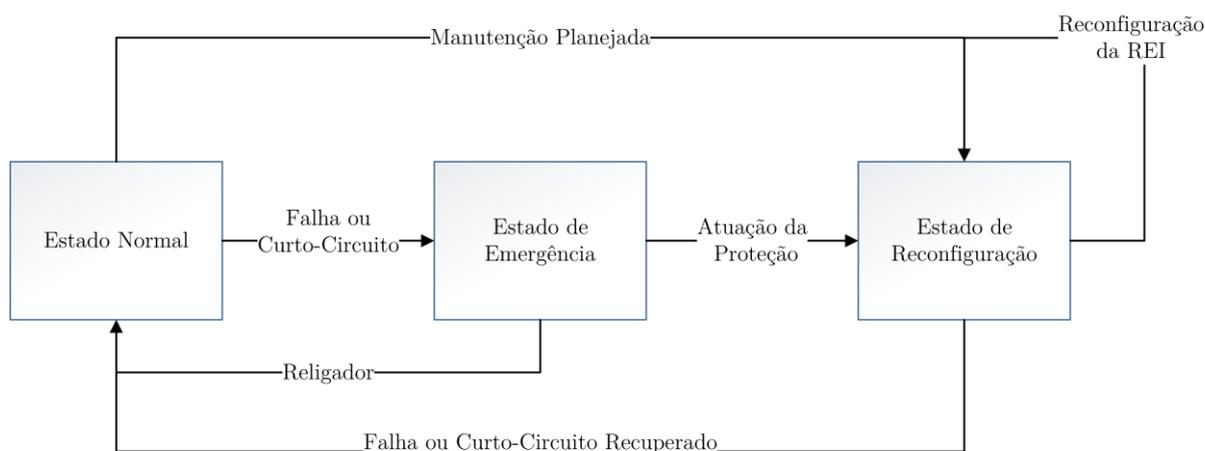
De maneira geral, a operação de reconfiguração de redes inteligentes de energia procura isolar uma área com problemas, ao mesmo tempo em que a quantidade de cargas não supridas é minimizada. Ou seja, a metodologia de reconfiguração de redes inteligentes busca o equilíbrio de potência a um custo de mínima rejeição de carga, basicamente, antes do estado de restauração do sistema existem outros estados para operação de um sistema elétrico de potência (GARCIA, 2005; FRANCO *et al*, GUEDES *et al*, 2012; BENTO, 2013; PEREIRA *et al*, 2014). Estes estados estão listados abaixo:

- ✓ Estado Normal: A rede está funcionando em estado regular, com todas as cargas atendidas. Em função do carregamento do sistema, procedimentos de controle, como controle do nível de tensão e controle do fluxo de reativos, podem agir sobre o sistema ao longo do tempo, mantendo-o no estado regular;
- ✓ Estado de Emergência: A rede está em estado de Emergência quando ocorre algum evento de falha no sistema, manutenção planejada e curto circuito em algum alimentador. Assim, os limites operativos do sistema são violados e algum procedimento de proteção é iniciado;

- ✓ Estado de Reconfiguração}: A rede está em estado de reconfiguração, quando a topologia da rede foi alterada. Esta alteração pode ter sido provocada pela atuação de dispositivos de proteção ou por manobras.

A Figura 20 mostra a representação dos estados possíveis para um sistema de energia elétrica.

Figura 20 - Estados da topologia de um Sistema Elétrico de Potência



Fonte: Elaboração Própria

Em um evento de contingência na rede de distribuição, seja por uma falta ou necessidade de manutenção programada, o procedimento de reconfiguração que caracteriza o problema abordado neste trabalho é executado pelas seguintes operações na rede:

- ✓ Identificação do local do evento de contingência;
- ✓ Execução do isolamento mediante a abertura de chaves de manobra;
- ✓ Identificação de possibilidades de mudança na topologia da rede;
- ✓ Indicadores de qualidade da rede sejam melhorados, comparando com a situação atual;
- ✓ Realização da manutenção e/ou tratamento da falha ocorrida;
- ✓ Retorno à topologia normal de operação da rede.

O problema objeto da metodologia proposta neste trabalho consiste na obtenção de um plano de manobras dos disjuntores existentes na rede que permita executar a reconfiguração de forma rápida dada uma situação de contingência ou manutenção.

A reconfiguração da rede em situações de contingência pode ser abordada em duas etapas: o isolamento da parte da rede onde está localizado o evento de contingência, e o processo de obtenção de uma configuração otimizada que será utilizada durante a manutenção da parte da rede que foi isolada e do restante do sistema que necessita de reconfiguração.

4.1.1 Utilização de Zonas de Proteção

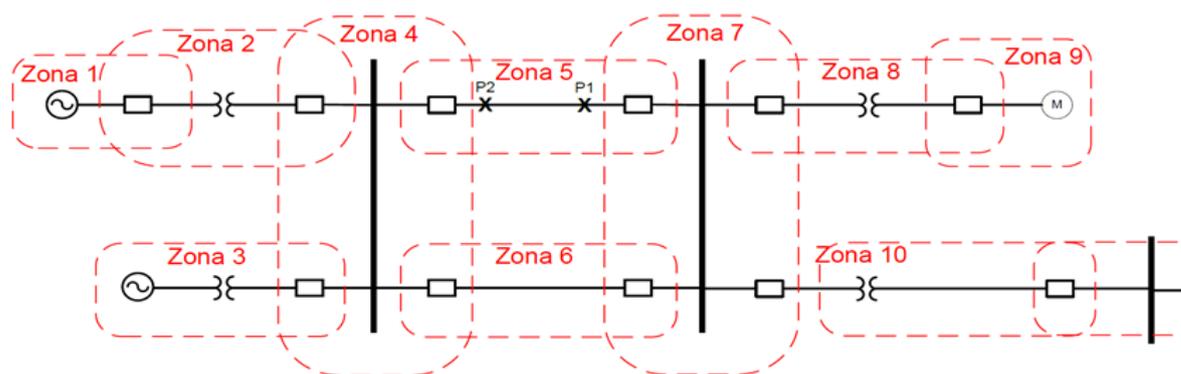
Segundo Blackburn e Domin (2006), o conceito de divisão do sistema elétrico em zonas de proteção é fundamental para redes que podem ser reconfiguradas e que possuem geração distribuída. Quando ocorre uma falha em qualquer lugar de uma zona, o sistema de proteção deve atuar para isolar aquela zona do resto do sistema elétrico. Essas zonas de proteção são definidas de forma diferente para cada um dos componentes:

- ✓ Geradores;
- ✓ Transformadores;
- ✓ Barramentos;
- ✓ Linhas de transmissão e distribuição;
- ✓ Motores.

Em seguida, a Figura 21 é utilizada para ilustrar o conceito de zonas de proteção. Cada zona é delimitada por uma linha pontilhada. A Zona 1, por exemplo, contém um gerador e o disjuntor que o conecta a um transformador. Geralmente, uma zona pode conter mais de um componente. A Zona 3, por exemplo, inclui uma unidade gerador-

transformador e o disjuntor que o conecta a um barramento, e a Zona 10 contém um transformador e uma linha de distribuição de energia.

Figura 21 - Separação de um sistema elétrico por zonas de proteção



Fonte: Bento (2013).

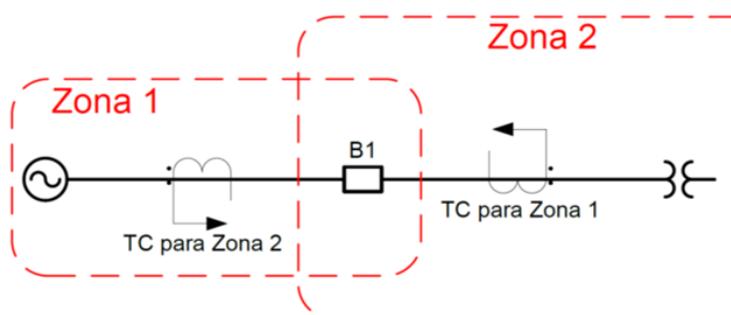
Existem casos onde uma falha está dentro de uma zona, então o sistema de proteção atua abrindo todos os disjuntores situados dentro daquela zona. Por exemplo, se uma falha ocorre em P1, na Figura 21, na linha de distribuição da zona 5, todos os disjuntores da zona 5 devem abrir. Se a falha ocorre dentro de uma intersecção entre duas zonas, então uma região maior do sistema de energia elétrica é atingida, pois duas zonas têm seus disjuntores abertos. Para minimizar essa possibilidade, as regiões de sobreposição entre zonas são mantidas tão pequenas quanto possível (GLOVER e SARMA, 2012; BENTO, 2013)

Adicionalmente, zonas vizinhas se sobrepõem com o objetivo de evitar a possibilidade de que hajam áreas desprotegidas. Caso não houvesse essa sobreposição, as pequenas áreas situadas entre zonas adjacentes não seriam protegidas. Visto que o isolamento das regiões afetadas por falha é realizado por disjuntores, esses devem ser inseridos entre qualquer equipamento situado em uma zona e cada conexão com o restante do sistema elétrico. Por essa razão, os disjuntores identificam os limites de cada

zona (GARCIA, 2005; BLACKBURN e DOMIN, 2006). Para exemplificar este caso, na Figura 21, a zona 5 está conectada com as zonas 4 e 7. Dessa forma, um disjuntor é localizado dentro da região de intersecção entre as zonas 5 e 4, e também entre as zonas 5 e 7.

A Figura 22 indica que, para realizar a sobreposição entre zonas, é necessário utilizar dois conjuntos de transformadores e relés para cada disjuntor. Por exemplo, o disjuntor da região de sobreposição das zonas 1 e 2 pode ser acionado por qualquer um dos dois Transformadores de Corrente (TCs), um para a zona 1 e um para zona 2 (BENTO, 2013).

Figura 22 - Superposição de zonas de proteção



Fonte: Bento (2013).

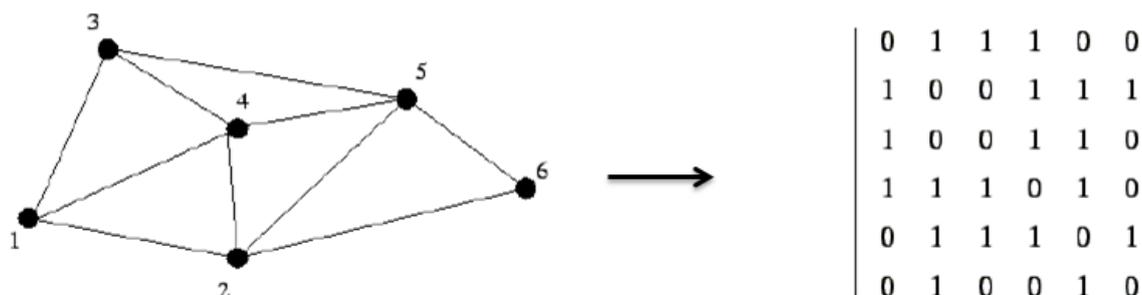
4.2 Representação e Modelagem de Redes Inteligentes como Grafos

Uma rede inteligente de energia tem por objetivo mapear os elementos geradores de energia com os consumidores. Uma rede de energia elétrica pode ser modelada como um grafo $G = (V,E)$, o qual V representa o conjunto de vértices, também chamados de nós, e E representa o conjunto de arestas também chamadas de ligações ou conexões. Assim, uma maneira de representar computacionalmente um grafo G é a matriz de adjacência, que é uma matriz A quadrada $N \times N$, sendo $N=|V|$, em que $A_{i,j}=1$ se $(v_i,v_j) \in E$ e 0 caso contrário (SILVA, 2014).

Esse procedimento é utilizado no trabalho para entrada dos dados e pode ser visto de maneira ilustrativa na Figura 23.

Fonte: Elaboração Própria

Figura 23 - Representação de um Grafo em Matriz de Adjacência

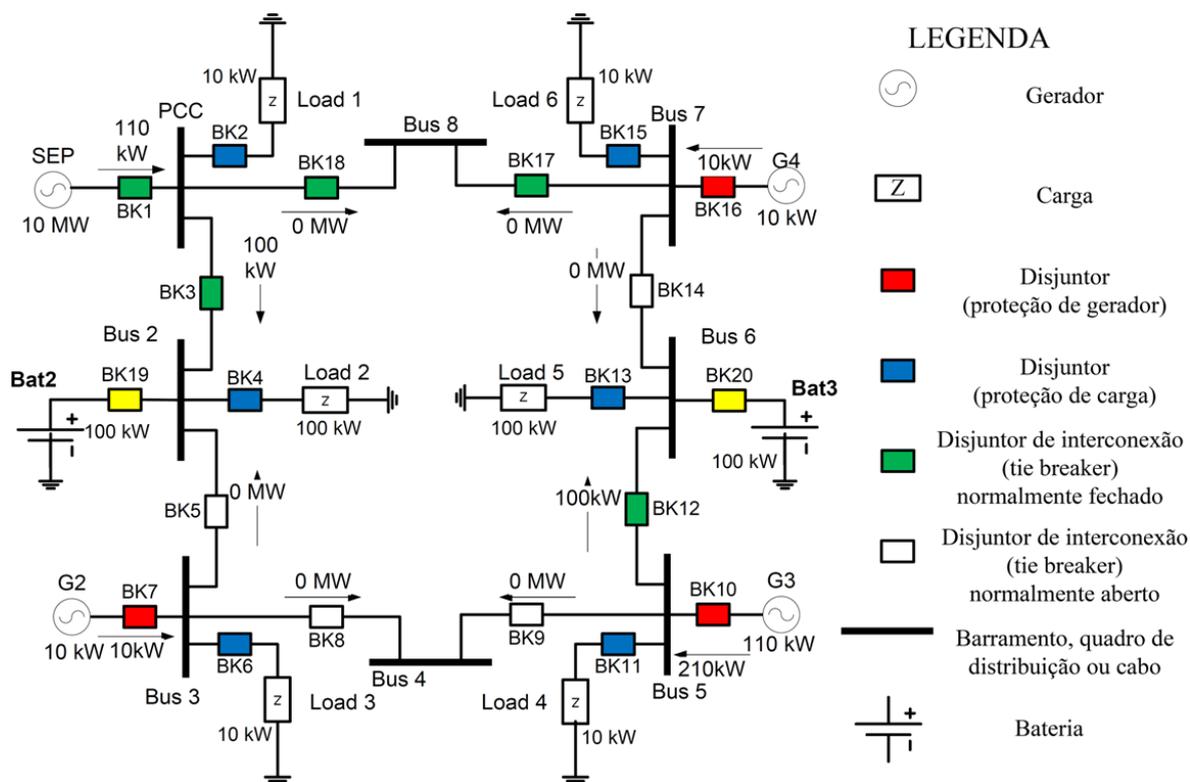


Em termos gerais, grafos são muito utilizados para modelar sistemas reais, neste trabalho a representação de grafos é utilizada para modelar os componentes das redes de distribuição de energia. Nestes podem estar incluídos os geradores, barramentos, cabos e cargas. No caso das redes inteligentes, inclui-se também os dispositivos de armazenamento de energia, isto é baterias, os quais ora se comportam como cargas e ora como geradores. As baterias, com suas cargas e descargas, controlam as flutuações características da geração provenientes de recursos renováveis nas microfones (geradores da microrrede). Cada agrupamento, ou banco de baterias é equipado com um inversor bidirecional que pode absorver energia em excesso, se disponível na microrrede, ou fornecer energia, se ocorrer uma falha. Se a capacidade de geração das microfones é maior que aquela requerida pelas cargas, o excesso de energia pode ser exportado para o SEP através do PCC.

O presente trabalho é considerada a condição de operação do sistema estável (sistema em regime permanente), isto é, após o transitório entre os modos de operação da microrrede. Dessa forma, tanto a intermitência das fontes renováveis, quanto o processo de carga e descarga das baterias serão abstraídas, deixando sua análise transitória para abordagem em trabalhos futuros. Essa condição permite modelar as microfones variantes ao sistema, da mesma forma que as fontes estáveis.

Como exemplo, a Figura 24 mostra um diagrama unifilar para o sistema elétrico de um navio, o qual consiste de seis quadros de distribuição (Bus 1, Bus2, Bus3, Bus5, Bus6 e Bus7), dois cabos (Bus4 e Bus8), quatro geradores (G1, G2, G3 e G4), vinte disjuntores (com Transformadores de Corrente - TCs) e duas baterias (Bat2 e Bat3).

Figura 24 - Diagrama unifilar de representação de uma microrrede



Fonte: Bento (2013).

Como já apresentado, modelar objetos como grafos permite uma representação arbitrária das relações entre as entidades. Para isso, a Tabela 2 indica os componentes de uma REI bem como os elementos representados nos grafos utilizados neste trabalho.

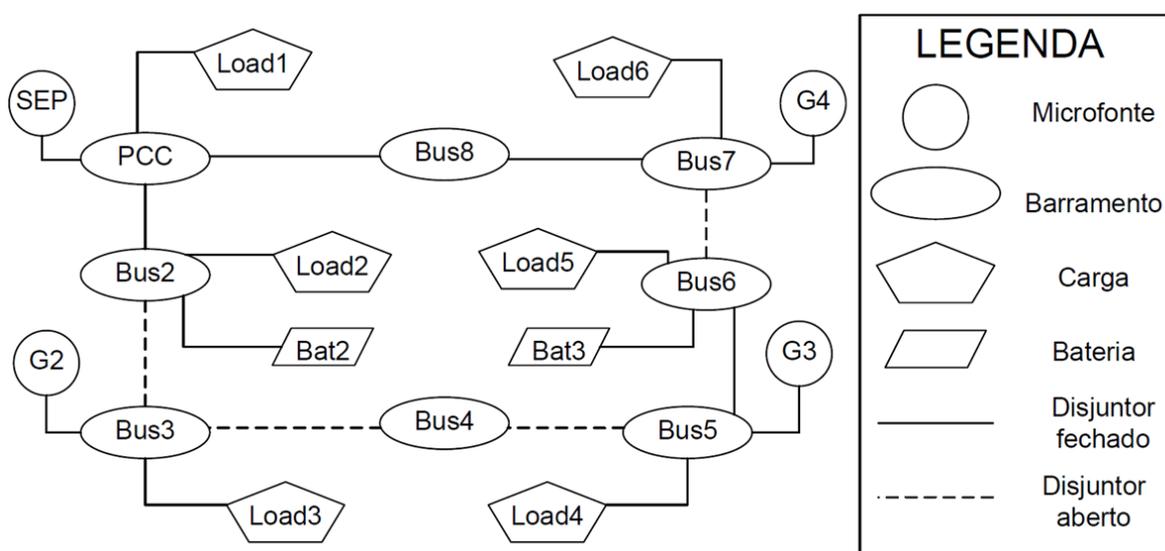
Tabela 2 - Componentes de uma REI modelados em um grafo

Componentes da Microrrede	Elemento no Grafo
Microfonte	Vértice
Barramento	Vértice
Carga	Vértice
Sistemas de Armazenamento	Vértice
Disjuntor	Aresta

Fonte: Elaboração Própria

O diagrama unifilar apresentado na Figura 24, é convertido em um grafo e apresentado no trabalho de Bento (2013). Essa ilustração na forma de um grafo é indicada na Figura 25.

Figura 25 - Representação de uma microrrede como um grafo.



Fonte: Bento (2013).

Conforme os princípios da proteção por zona, cada barramento diretamente conectado a disjuntores é definido como uma zona no esquema de proteção. No correspondente grafo de representação do sistema, cada zona de proteção é definida por um vértice e por arestas diretamente conectadas a tal vértice. A Tabela 3, associa cada disjuntor, do esquema apresentado na Figura 24, a uma ou mais zonas de proteção.

Tabela 3 - Zonas de Proteção apresentadas na Microrrede

Zona/ Componente Protegido	Disjuntores conectados
Zona1 / Bus1	BK1, BK2, BK3, BK18
Zona2 / Bus2	BK3, BK4, BK5, BK19
Zona3 / Bus3	BK5, BK6, BK7, BK8
Zona4 / Bus4	BK8, BK9
Zona5 / Bus5	BK9, BK10, BK11, BK12
Zona6 / Bus6	BK12, BK13, BK14, BK20
Zona7 / Bus7	BK14, BK15, BK16, BK17
Zona8 / Bus 8	BK17, BK18

Fonte: Elaboração Própria

4.3 Procedimentos para Reconfigurações de REIs

O objetivo da operação de reconfiguração de redes de energia consiste em manter as cargas mais importantes do sistema no estado de pré-falha e, somente se necessário, rejeitar carga(s) (ROMANO *et al*, 2013; PEREIRA *et al*, 2014).

O sistema de proteção controla continuamente a configuração da rede inteligente e o fluxo de potência através de cada disjuntor. Quando algum componente da microrrede está em falha, o sistema de proteção rapidamente a detecta, localizando a zona em que

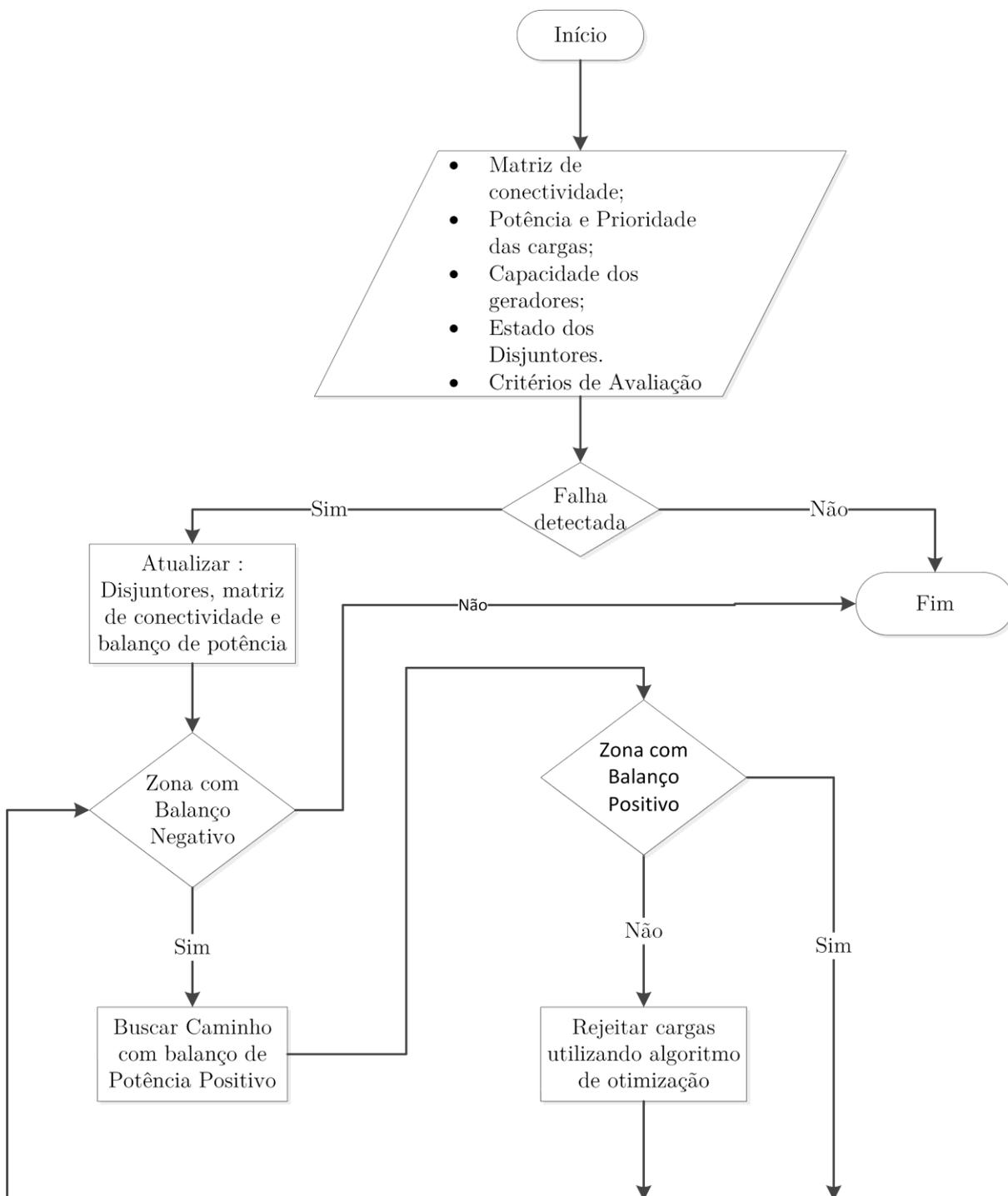
ocorreu o problema, e envia um sinal de desconexão (trip) para os disjuntores em torno da zona em falha, a fim de isolá-la (BERGER e INIEWSKI, 2015). Assim, é possível identificar o balanço de potência das zonas do sistema que não foram atingidas pela falha, levando em conta os dados armazenados antes da falha e após a contingência (BLACKBURN E DOMIN, 2006).

Para realização do cálculo do balanço de potência de cada zona de proteção, a metodologia de reconfiguração substitui a potência fornecida em tempo real por cada gerador pela respectiva capacidade nominal, tal procedimento foi realizado por Bento (2013). Porquanto, quaisquer zonas que não estejam com problema e que não tenham capacidade de geração suficiente para compensar o fluxo de potência que antes era fornecido por regiões que agora estão com falha devem ser conectadas a outras regiões que estejam funcionando corretamente, a fim de manter o atendimento as suas cargas conectadas à microrrede.

O algoritmo definido para a reconfiguração da rede de energia determina através de uma busca heurística se a configuração da rede, após a(s) falha(s), possui balanço de potência adequado. Se qualquer subsistema da rede inteligente, localizado por busca heurística, possuir déficit de potência após todas as conexões possíveis de zonas, as cargas menos prioritárias desse subsistema são rejeitadas, a fim de minimizar a perda de fornecimento de energia para as cargas mais importantes.

Dessa forma a aplicação do método baseado na metaheurística GRASP, discutido no capítulo anterior, pode determinar os dados da rede após a falha, um caminho com balanço de potência positivo e então a uma possível rejeição de uma carga. O fluxograma do algoritmo executado para alcançar tais objetivos é apresentado na Figura 26, indicando o início com o carregamento das configurações gerais do sistema e em seguidas os processos realizados para o cálculo do fluxo de potência e o caminho destinado pelo sistema quando a única opção possível para solução do problema consiste na rejeição de cargas.

Figura 26 - Fluxograma do Sistema de Reconfiguração de REIs



Fonte: Elaboração Própria

4.4 Formulação do Problema de Reconfiguração de Redes Inteligentes de Energia.

Tradicionalmente, três conceitos são comuns para qualquer técnica algorítmica para resolução de problemas: a representação da solução, que define qual será a interpretação e qual será o espaço de busca da solução requerida; o objetivo, o qual corresponde a uma expressão em que se define o que se busca com uma possível solução do problema; e a função de avaliação, que representa um mapeamento do espaço de soluções viáveis ou não (GARCIA, 2005; PIZZOLATO e GANDOLPHO, 2013; ANDRADE, 2015).

A função objetivo para o problema de reconfiguração das redes elétricas inteligentes consiste em maximizar a potência total entregue às cargas, garantindo o balanço entre capacidade de geração e demanda das cargas não rejeitadas (balanço de potência) durante o processo de reconfiguração.

A função objetivo é definida da seguinte maneira:

$$P_{Demanda} = \text{Max} \left(\sum_1^n L_d \right), \text{ com } n \in \mathbf{Z}^+ \quad (1)$$

Sujeito a $P_{ger.} \geq P_{Demanda}$,

Onde L_i são os valores das potências das cargas e P_{ger} representa a capacidade de geração total disponível após o isolamento da falha ocorrida no sistema da rede de energia.

A função de avaliação possui três objetivos com diferentes fatores de ponderação, potência, prioridade e o número de chaveamentos. O valor dos fatores é selecionado para definir se a decisão de rejeitar cada carga será mais influenciada pela por um ou outro fator, assim quando a escolha do fator fortalecer a opção de potência, o espaço de busca

irá priorizar o sistema de avaliação da potência máxima entregue a carga; de forma análoga aos sistemas que tiverem maior fator de ponderação para a escolha de prioridade ou chaveamento. A magnitude da função de avaliação também depende da configuração \mathbf{x} de cada disjuntor (1 para fechado e 0 para aberto).

A função de avaliação do sistema é definida como:

$$f(\mathbf{x}) = f_1(\mathbf{x}) + f_2(\mathbf{x}) - f_3(\mathbf{x}) \quad (2)$$

A função $f_1(\mathbf{x})$ é definida como a função que avalia a prioridade das cargas:

$$f_1(\mathbf{x}) = \alpha \cdot \mathbf{x} \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{L}^t \quad (3)$$

A função $f_2(\mathbf{x})$ é definida como a função que avalia a solução segundo o critério da potência das cargas:

$$f_2(\mathbf{x}) = \beta \cdot \mathbf{x} \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{L}^t \quad (4)$$

A função $f_3(\mathbf{x})$ é definida como a função que avalia a solução segundo de números de chaveamentos:

$$f_3(\mathbf{x}) = \lambda \cdot (|x_{\text{mod}} - \mathbf{x}|) \quad (5)$$

onde:

- ✓ $\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n]$ é um vetor em que cada elemento corresponde à configuração de um disjuntor responsável por conectar ou desconectar uma determinada carga, sendo que $x_i = 1$ indica que o disjuntor está fechado e $x_i = 0$ indica que o disjuntor está aberto, com $i = 1, 2, 3, \dots, n$;
- ✓ $\mathbf{I}^{n \times n}$ é uma matriz identidade;
- ✓ $\mathbf{L} = [L_1 \quad L_2 \quad \dots \quad L_n]$ é o vetor com os valores de potência de cada carga;
- ✓ $\mathbf{P}^{n \times n}$ é uma matriz diagonal com as prioridades das cargas;
- ✓ $x_{\text{mod}} = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n]$ é um vetor em que cada elemento corresponde à configuração de um disjuntor responsável por conectar ou desconectar uma determinada carga logo após a ocorrência da falta no sistema, sendo que $x_i = 1$

indica que o disjuntor está fechado e $x_i = 0$ indica que o disjuntor está aberto, com $i = 1, 2, 3, \dots, n$;

- ✓ α, β, λ são fatores de ponderação para seleção de cargas com base na prioridade, na magnitude da carga, e no número de chaveamentos respectivamente, sendo que a soma de tais fatores é igual à unidade.

Substituindo as equações é possível determinar o seguinte modelo matemático para representação do problema de reconfiguração de redes de energia:

$$\text{Maximizar } Z = |\alpha \cdot \mathbf{x} \cdot f_1(\mathbf{x}) - \beta \cdot \mathbf{x} \cdot f_2(\mathbf{x}) - \lambda \cdot \mathbf{x} \cdot f_3(\mathbf{x})|;$$

Sujeito a:

$$f_1(\mathbf{x}) = \mathbf{x} \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{L}^t;$$

$$f_2(\mathbf{x}) = \mathbf{x} \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{L}^t;$$

$$f_3(\mathbf{x}) = |x_{\text{mod}} - \mathbf{x}|;$$

$$\alpha + \beta + \lambda = 1000;$$

$$\mathbf{x} \in [0, 1];$$

$$x_{\text{mod}} \in [0, 1];$$

$$\mathbf{P} \in \mathbb{N};$$

$$\mathbf{L} \in \mathbb{R};$$

$$\alpha, \beta, \lambda \in \mathbb{R};$$

Restrição para manter o sistema Radial;

Função de Avaliação:

$$f_{\text{Avaliação}}(\mathbf{x}) = |\alpha \cdot \mathbf{x} \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{L}^t - \beta \cdot \mathbf{x} \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{L}^t - \lambda \cdot |x_{\text{mod}} - \mathbf{x}| - P_{\text{não_radialidade}}|$$

4.5 Desenvolvimento da Metaheurística GRASP

A metaheurística GRASP, como já citada no capítulo anterior, é um processo iterativo do tipo *multi-start* para obter soluções aproximadas, eventualmente ótimas, para problemas de otimização combinatória. Suas iterações consistem, basicamente, de duas fases: uma de construção e outra de busca local. A primeira fase tem como objetivo gerar uma solução viável para o problema proposto. Esta solução é construída iterativamente elemento a elemento e posteriormente, na fase de busca local, é aprimorada com buscas nas suas vizinhanças até que um ótimo local seja encontrado. Ao final da execução, temos como resultado a melhor solução encontrada ao longo de todas as iterações do GRASP.

Em seguida, é apresentado um pseudo-código da GRASP. Na linha 1 do pseudo-código a melhor solução e a sua função objetivo são inicializadas. Na linha 2 são lidos os dados de entrada do problema, para o problema de em questão, os dados carregados correspondem a matriz de conectividade, a potência e a prioridade das cargas, capacidade dos geradores e o estado de cada um dos disjuntores.

As iterações GRASP são realizadas das linhas 3 à 9 e terminadas após realizadas *MaxIter* iterações, se tornando a condição de parada do algoritmo. Na linha 4 é executada a fase de construção, enquanto na linha 5 é a fase de busca local. Na linha 6 é feita a verificação se a solução obtida pela iteração é melhor do que a melhor solução encontrada até o momento; em caso positivo, na linha 7 é feita a atualização da melhor solução e da sua função de avaliação.

Metaheurística GRASP

1. $f^* \leftarrow \infty ; X^* \leftarrow 0;$
2. *Ler os dados do Problema*
3. **PARA** $k = 1, \dots, \text{MaxIter}$ **FAÇA**
4.*Construir uma solução randomizada x (fase de construção);*
5.*Encontrar y aplicando busca local a x (fase de busca local);*
6.**SE** $f(y) < f^*$ **ENTÃO**
7. $X^* \leftarrow y; f^* \leftarrow f(y);$
8.**FIM-SE**
9. **FIM-PARA**
10. *Retornar X^**
11. **FIM GRASP**

Durante o procedimento do algoritmo, cada iteração da fase de construção, o conjunto de elementos candidatos é formado por todos os elementos que ainda não foram incorporados à solução parcial em construção e que não inviabilizam a solução caso venham a ser incorporados. A escolha do próximo elemento a ser incorporado é determinada pela avaliação de todos os elementos candidatos de acordo com uma função gulosa. Para realizar essa operação a função avalia os benefícios ganhos com a inserção deste elemento na solução em construção (custo incremental). Esse custo para o problema de reconfiguração determina o estado dos disjuntores que produz o maior valor de potência das cargas, mantidas as prioridades iniciais.

Entretanto se faz necessário realizar uma abordagem diferenciada para cada quando é dado o destaque para um dos fatores de ponderação, ou seja, a fase construtiva da metaheurística é formada por três estratégias heurísticas diferentes, como indicado a seguir:

- ✓ $\alpha \geq \beta, \lambda =$ O método heurístico 1 de construção das soluções irá priorizar o critério das prioridades das cargas, ou seja, atender as cargas com maior prioridade do sistema;
- ✓ $\beta \geq \alpha, \lambda =$ O método heurístico 2 de construção das soluções irá priorizar o critério das potências das cargas do sistema, ou seja, atender as cargas com maior potência do sistema;
- ✓ $\lambda \geq \beta, \alpha =$ O método heurístico 3 de construção das soluções irá priorizar o critério de número mínimo de chaveamento.

Esses métodos estão listados abaixo.

Método Heurístico 1

1. $X \leftarrow 0$;
 2. **ENQUANTO** X não for uma solução completa **FAÇA**
 3.Avaliar os custos dos elementos candidatos segundo a prioridade das cargas;
 4.Construir LRC;
 5.Selecionar aleatoriamente um elemento S dentre os da LRC;
 6. $X \leftarrow X \cup S$;
 7. **FIM-ENQUANTO**;
 8. Retornar X ;
 9. **FIM** Fase de Construção;
-

Método Heurístico 2

1. $X \leftarrow 0$;
 2. **ENQUANTO** X não for uma solução completa **FAÇA**
 3.Avaliar os custos dos elementos candidatos segundo a potência das cargas;
 4.Construir LRC;
 5.Selecionar aleatoriamente um elemento S dentre os da LRC;
 6. $X \leftarrow X \cup S$;
 7. **FIM-ENQUANTO**;
 8. Retornar X ;
 9. **FIM** Fase de Construção;
-

Método Heurístico 3

1. Inicialmente todas as chaves estão fechadas;
2. Iniciar a abertura de uma chave normalmente fechada
3. Executa-se um teste de parada que consiste em que, se existe uma quantidade de chaves fechadas, equivalente ao número de chaves fechadas para se obter uma rede radial, o procedimento cessa e a configuração atual da rede fornece a solução desejada;
4. Utiliza-se a representação nó profundidade do sistema;
5. Escolher uma chave a ser aberta temporariamente, se a rede ficar desconexa, retornar ao passo 3, se não, abrir definitivamente a chave e retornar ao passo 2.

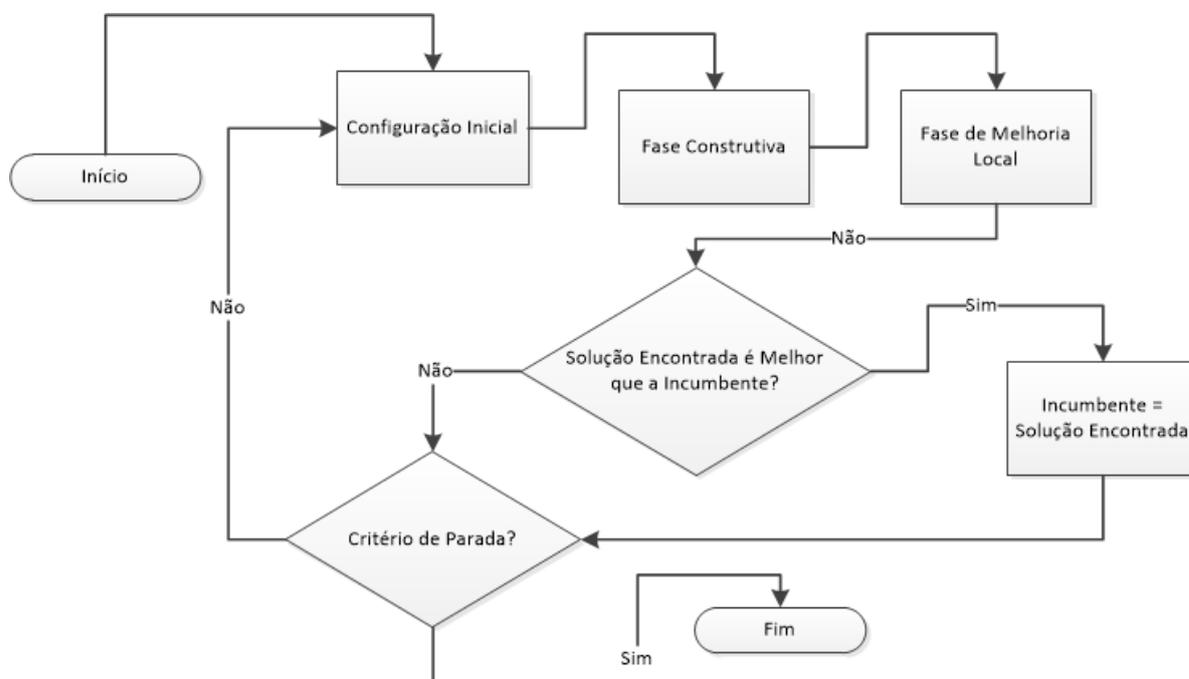
A solução gerada pela fase de construção do GRASP não representa necessariamente um ótimo local. Portanto, como forma de melhorar essa solução, se faz

necessário aplicar uma busca local com o objetivo de melhorar a solução inicial. A busca local trabalha de um modo iterativo, substituindo sucessivamente a solução corrente por uma solução melhor pertencente à vizinhança da solução corrente, terminando quando nenhuma solução melhor for encontrada na vizinhança.

Uma estrutura de vizinhança N para um problema P relaciona a solução x do problema a um subconjunto de soluções $N(x)$. Uma solução x é considerada ótimo local segundo $N(x)$ se não existir melhor solução que x em $N(x)$. Dada uma estrutura de vizinhança N , o método de busca local do algoritmo GRASP, indicado neste trabalho, será implementado segundo os procedimentos da metaheurística VND, já apresentada no capítulo anterior.

Dessa forma um fluxograma da aplicação desenvolvida neste trabalho para a reconfiguração de redes inteligentes é mostrada na Figura 27

Figura 27 - Fluxograma da Metaheurística Grasp



Fonte: Elaboração Própria

4.6 Ambiente de Implementação

O ambiente de implementação escolhido para execução do projeto foi o Matlab, por ser um software computacional conhecido mundialmente como uma excelente ferramenta para soluções de problemas matemáticos, científicos e tecnológicos, que possui comandos muito próximos da forma como escrevemos as expressões matemáticas, podem ser usado como prancheta de rascunhos para avaliar expressões digitadas nas linhas de comando, ou para executar programas grandes previamente escritos, pois ele possui um ambiente de desenvolvimento integrado embutido, um depurador de informações. Por ser muito fácil de usar, a linguagem é ideal para uso educacional e para desenvolver rapidamente protótipos de novos programas.

O hardware de execução e desenvolvimento deste trabalho foi o Notebook Dell Inspiron modelo 15R SE-4670 com processador Intel Core i7 8GB de memória RAM DDR3, com 2GB de Memória Dedicada, 1TB de HD e 32GB SSD.

4.7 Indicadores de Desempenho da Reconfiguração de Redes Inteligentes de Energia

Assim como vários autores da revisão bibliográfica, este trabalho também utiliza indicadores de desempenho, uma vez que, são ferramentas imprescindíveis em sistemas sujeitos a critérios de otimização. Eles permitem uma análise quantitativa e objetiva de distintas soluções aplicadas a um mesmo problema. Logo, são formalizados a seguir alguns Indicadores de Desempenho simples e objetivos, os quais atendem a necessidade presente.

No trabalho realizado por Bento (2013) é apresentado o índice de carga atendida (I_{CA}), Bento destaca que:

- ✓ I_{CA} independe da Capacidade Instalada (C_i);

- ✓ $I_{CA} = 0$ se e somente se $C_n = C_R = 0$ ou $C_n \neq 0$ e $C_R = 0$., indicando a existência de uma microrrede normalmente sem carga pendurada, isto é, apenas com geração. No segundo caso, $C_R = 0$ indica que nenhuma carga da microrrede está sendo atendida pela configuração pós-falha, o que implica em uma péssima solução para o problema.
- ✓ Quanto mais próximo o I_{CA} estiver de 0 (zero), pior é a consequência ocasionada por uma falha. Em contrapartida, quanto mais próximo o I_{CA} estiver de 1 (um), menor é tal consequência.

$$\text{Índice De Carga Atendida} \quad I_{CA} = \frac{C_R}{C_n} \quad (6)$$

Adicionalmente, este trabalho propõe a criação de 2 novos índices, o indicador de Velocidade (I_v) e o Indicador de Qualidades (I_{pri}), formulados abaixo:

- ✓ **Indicador de Velocidade (I_v) :**

$$I_v = I_{CA} + \frac{Ich_posc}{Ich_prec} \cdot P_{rad} \quad (7)$$

Onde, Ich_posc representa o número de disjuntores ativos após a contingência;

Ich_prec representa o número de disjuntores ativos no início do processo.

- ✓ **Indicador de Qualidades (I_{pri}) :**

$$I_{pri} = \frac{\sum P_{riposc}}{\sum P_{riprec}} \quad (8)$$

Onde, P_{riposc} representa as cargas com maior prioridade, atendidas após a contingência; e P_{riprec} representa com as cargas com maior prioridade, atendidas início do processo.

Capítulo 5: Considerações Finais e Próximos Passos

Ao analisar os aspectos da utilização de microrredes percebe-se claramente que o modelo clássico de fornecimento de energia não é a opção mais vantajosa de uso para geração de energia. Os avanços na tecnologia de proteção e controle estão permitindo que sejam implementados sistemas que trazem benefícios técnicos, econômicos e ambientais com a utilização de novas fontes de energia.

De maneira geral, a utilização de redes elétricas inteligentes por meio é vantajosa pois apresentam maior confiabilidade pela presença de microrredes, afinal existem mais caminhos para o fluxo de potência no modo acoplado ao sistema, permitindo suprir áreas em contingência que poderiam ter que ser desligadas devido a altas demandas. Além disso, outra grande vantagem consiste na independência em relação ao sistema interligado, ou seja, uma microrrede pode operar também em modo isolado no caso de grandes perturbações ou contingências que afetariam a qualidade do fornecimento de energia.

Inserindo-se neste contexto, o presente trabalho focou no estudo na resolução do problema de reconfiguração de redes elétricas inteligentes, que como já citado, consiste em apresentar caminhos alternativos que estabeleçam conexões entre as cargas que não pertençam à região em falha e as fontes que permanecem disponíveis e conectadas à rede, com o intuito de manter o balanço de potência de porções de uma rede inteligente não atingidas por falhas e minimizar a rejeição de cargas, principalmente as de maior prioridade e de maior potência.

Para isso, na fase inicial do trabalho foi feita uma pesquisa bibliográfica sobre os métodos de representação de problemas como grafos, bem como, os procedimentos de

busca e repartição de grafos, procedimentos heurísticos aplicados a diversos problemas de otimização.

O método utilizado neste trabalho como proposta para resolução do problema de reconfiguração, o GRASP, é atualmente considerado como uma das melhores metaheurísticas para problemas de otimização combinatória de elevada complexidade computacional (Problemas NP-Completo e NP-Difícil).

Adicionalmente, como próximos passos pretende-se aplicar o método da heurística híbrida apresentada nesse trabalho, em uma rede de 54 barras apresentada no trabalho de Pereira Júnior (2012), além da confecção de novos sistemas testes, com a finalidade de avaliar o espaço de solução gerado pelo algoritmo proposto.

As heurísticas de construção e de busca local serão padronizadas e apresentadas de forma específica para o problema final, bem como os procedimentos utilizados para a confecção das soluções finais. Para isso, pretende-se inserir uma estratégia de representação nó-profundidade, bem como, a utilização de algoritmos específicos da teoria dos grafos na busca por uma solução factível com o menor custo possível.

Referências Bibliográficas

- ABABEI, C. E KAVASSERI, R. Efficient Network Reconfiguration Using Minimum Cost Maximum Flow-Based Branch Exchanges and Random Walks-Based Loss Estimations. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, pp. 30-37, 2011.
- ABAQUE - Associação Brasileira de Armazenamento e Qualidade de Energia. Fundamentos Básicos Gerais das Tecnologias de Armazenamento de Eletricidade. Maio de 2015. Disponível em < <http://www.abaque.com.br/uploads/armazenamento-energia.pdf> > Acesso em janeiro de 2016
- AHUJA, R. K.; ORLIN, J. B. Use of representative operation counts in computational testings of algorithms. Working papers 3459-92, Massachusetts Institute of Technology (MIT), *Sloan School of Management*, 1992.
- ALCÂNTARA, M. V. P. Microrredes inteligentes: um novo modelo de negocio para a distribuição de energia elétrica, 2010. Acesso em 02 de janeiro de 2016. Disponível em <http://www.osestoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/>
- ALCÂNTARA, M. V. P.; SILVA, Luiz C. P. da ; Geraldi, D. . Energy Efficiency in Smart Grids. In: II Conference on Innovative Smart Grid Technologies - IEEE ISGT Latin America 2013, 2013, São Paulo. Anais ISGT-LA 2013, 2013.
- ALSHARIF, M. H.; NORDIN, R.; ISMAIL, M. Green wireless network optimisation strategies within smart grid environments for Long Term Evolution (LTE) cellular networks in Malaysia. *Renewable Energy*, Vol.85, p.157(14), ISSN: 0960-1481, 2016.
- ALVARENGA, M. C. C. M. ; PETROLI NETO, Silvio . Uma Proposta Para A Simulação Da Distribuição Eficiente De Cargas Através De Sistemas Imunológicos Artificiais. Intellectus. *Revista Acadêmica Digital da Faculdade de Jaguariúna* , v. 19, p. 7-28, 2012
- ALVIM, A. C. F. Desafios e perspectivas de p&d na geração de energia elétrica. *Revista Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL. P&D*, ISSN 1981-9803, pg.12, junho 2009.

- AMBROSIO, R. C.; TICIANELLI, E. A. Baterias de níquel-hidreto metálico, uma alternativa para as baterias de níquel-cádmio. *Quím. Nova*, vol.24, n.2, pp. 243-246. ISSN 1678-7064, 2001.
- ANDRADADE, E. L. *Introdução à pesquisa Operacional : Metodos e Modelos para Análise de Desisões*. 5° edição LTC - Rio de Janeiro, 2015
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. *Atlas de Energia Elétrica do Brasil* . 2ª Ed. – Brasília : ANEEL, 243 f., 2005.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. *Atlas de Energia Elétrica do Brasil* . 3ª Ed. – Brasília : ANEEL, 236 f., 2009.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Banco de Informações de Geração Capacidade de Geração do Brasil. Atualizado em: 10/02/2016. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>> Acesso em Fev. de 2016, 2016
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Chamada nº 011/ 2010 Projeto Estratégico: Programa Brasileiro de Rede Elétrica Inteligente. 2010. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/PeD_2008-ChamadaPE11-2010.pdf> Acesso em Dez. 2015
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. *Guia do Empreendedor De Pequenas Centrais Hidrelétricas*. Brasília : ANEEL, 2003. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/Guia_empreendedor.pdf> Acesso em Janeiro de 2016.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução ANEEL nº 345, de 16 de dezembro de 2008. Aprova os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, e dá outras providências. Brasília (DF), 2008. Disponível em: <[http://www.abricem2.com.br/web3/index.php?option=com_content&view=article&id=79%3Aeh...>](http://www.abricem2.com.br/web3/index.php?option=com_content&view=article&id=79%3Aeh...). Acesso em Setembro de 2015.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução ANEEL Nº 395, de 15 de Novembro de 2009; “Aprova a Revisão 1 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, e dá outras providências”. Brasília (DF), 2009. Disponível em: <

http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8_Revisao_0.pdf>. Acesso em Setembro de 2015.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução nº 673, de 4 de Agosto de 2015b. Estabelece os requisitos e procedimentos para a obtenção de outorga de autorização para exploração de aproveitamento de potencial hidráulico com características de Pequena Central Hidrelétrica – PCH. Disponível em <www.aneel.gov.br/cedoc/ren2015673.pdf> Acesso em janeiro de 2016, 2015b.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 482, De 17 de Abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída e dá outras providências. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>> Acesso em setembro 2015, 2012

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 664, de de 16 de junho de 2015a. Aprova alteração dos Módulos 1, 6 e 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST.. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2014/052/resultado/ren_2015_664.pdf>. Acesso em Dez, 2015a.

AUGUGLIARO, A., DUSONCHET, L. & SANSEVERINO, E.R. Multiobjective service restoration in distribution networks using an evolutionary approach and fuzzy sets. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 22(2), pp.103-110, 2000.

AZEVEDO, F. A. Otimização de rede de distribuição de energia elétrica subterrânea reticulada através de algoritmos genéticos. 2010. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010

AZEVEDO, G. M. de S. Controle e Operações de Conversores em Microrredes. 2012, 150f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, – Universidade Federal de Pernambuco, 2012.

BABA, C. M.; CORRÊA, F. H. M.; SOUZA, S. A. C.; WAHBA, T. M.; MEDINA, A. C. Otimização da colônia de formigas aplicada ao problema da programação e roteirização de veículos para o transporte de pessoas portadoras de deficiência.

- Anais do XXIV Encontro Nac. de Eng. de Produção - Florianópolis, SC, Brasil, 03 a 05 de nov de 2004
- BANDEIRA, F. P. M. *Redes de energia elétrica inteligentes (smart grids)*. Nota técnica. Consultoria Legislativa, 2012. Disponível em: <http://www2.camara.leg.br/documentos-e-pesquisa/publicacoes/estnottec/areas-da-conle/tema16/2012_7872.pdf>. Acesso em: nov. 2015.
- BARR, R. S.; GOLDEN, B. L.; KELLY, J. P.; RESENDE, M. G. C.; STEWART, W. R. Designing and Reporting on Computational Experiments with Heuristic Methods. *Journal of Heuristics*, 1:9–32, 1995.
- BENTO, F. R. O. Uma metodologia para reconfiguração de redes inteligentes. 2013. 118f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa de Pós Graduação em Energia - Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2013.
- BERGER, L. T. e INIEWSKI, K. *Smart Grid: aplicações, comunicação e segurança*. 1 ed - Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- BLACKBURN, J. L. DOMIN, T. J. Introduction and general philosophies. Protective Relaying - Principles and Applications - Third Edition, 2006.
- BONA, F. S.; RUPPERT FILHO, E. As microturbinas e a geração distribuída. In Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural, Campinas (SP), 2004.
- BOTEA, A.; RINTANEN, J.; BANERJEE, D. Optimal reconfiguration for supply restoration with informed aast search. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, v. 3, n. 2, p. 583 - 593, 2012.
- BOYLE, G. *Renewable energy: Power for a sustainable future*. 2nd edition. Oxford Press University, ISBN: 0-19-926178-4, 2004.
- BRASIL. Lei nº 10.438, de 26 de abril 2002. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE). Diário Oficial da União - Seção 1 - Edição Extra - 29/4/2002, Página 2.
- CAMILLO, M. H. M. ; FANUCCHI, R. Z. ; ROMERO, M. E. V. ; SOARES, T. W. L. ; SOARES, A. S. ; DELBEM, A. C. B. ; MARQUES, L. T. ; MACIEL, C. D. ;

- London, Jr., J. B. A. Combining Exhaustive Search and Multi-Objective Evolutionary Algorithm for Service Restoration in Large-Scale Distribution Systems. *Electric Power Systems Research*, v. 134, p. 1-8, 2016.
- CAMILLO, M. H. M. ; ROMERO, M. E. V. ; FANUCCHI, R. Z. ; SOARES, T. W. L. ; SOARES, A. S. ; BESSANI, M. ; MACIEL, C. D. ; LONDON Jr., J.B. A. . Otimização do Processo de Restabelecimento de Energia em Sistemas de Distribuição de Larga Escala. In: Congresso de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica (CITENEL), Costa do Sauípe, 2015
- CAMILLO, M. H. M. Avaliação de uma metodologia para restabelecimento de energia baseada em algoritmos evolutivos multi-objetivos no sistema de distribuição da COPEL na cidade de Londrina. São Carlos: USP, 2013. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Escola da USP – São Carlos, São Carlos, 2013.
- CAMILLO, M. H. M.; ROMERO, M. E. V.; FANUCCHI, R. Z.; LIMA, T. W.; MARQUES, L. T.; DELBEM, A. B. C.; LONDON JUNIOR, J. B. A. Avaliação de uma Metodologia para Restabelecimento de Energia a partir de Simulações Computacionais em um Sistema de Distribuição Real de Grande Porte. In: Congresso Latinoamericano de Control Automático, CLCA 2014, 2014, Cancúm. Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático, CLCA 2014, p. 768-773, 2014.
- CARMO, M. J.; SASS, F.; FERREIRA, A. C.; ANDRADE JUNIOR, R. Armazenadores de energia magnéticos supercondutores - smes: aplicações, viabilidade técnica e econômica. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática, CBA 2012. ISBN: 978-85-8001-069-5, 2012.
- CARRANO, E. G.; TAROCO, C. G. ; NETO, O. M. ; TAKAHASHI, R. H. C. . A multiobjective hybrid evolutionary algorithm for robust design of distribution networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 63, p. 645-656, 2014.
- CARVALHO, Joaquim F. de; SAUER, Ildo L.. Um sistema interligado hidro-eólico para o Brasil. *Estud. av.*, São Paulo , v. 27, n. 77, p. 117-124, 2013 . Disponível em < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142013000100009&lng=pt&nrm=iso >. Acesso em 10 nov. 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142013000100009>.

- CASARO, M. M.; MARTINS, D. C. Grid-connected PV system: Introduction to behavior matching. *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 951–956, June 2008.
- CAVALCANTE, P. L.; FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; GARCIA, A. V. ; MARTINS, L. L.; MALVEIRA, M. R. R.; FRANCO, R. J.; CARVALHO, P. F. S.; GUIMARÃES, D. S.; HERNANDES JUNIOR, L. J. Advanced Network Reconfiguration System Applied to CEMIG-D System, In: *Proceedings of the 2013 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGTLA 2013)*, paper 332, pp. 01–07, 2013.
- CECATI, C; MOKRYANI, GEEV ; PICCOLO, A. ; SIANO, P. An overview on the smart grid concept. *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. ISSN :1553-572X, Pp. 3322 - 3327, 2010.
- CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais S.A. Projeto Cidades Do Futuro Redes Inteligentes na Cemig. 2015. Disponível em <http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/sustentabilidade/nossos_programas/Redes_Inteligentes/Paginas/as_redes_inteligentes_na_cemig.aspx>. Acesso em Dez. 2015
- CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Redes elétricas inteligentes: contexto nacional. – Brasília, DF : Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Série Documentos Técnicos. Dezembro 2012 - nº 16. Disponível em <https://www.cgee.org.br/documents/10182/734063/Redes_Eletricas_Inteligentes_22mar13_9539.pdf> Acesso em Dez. de 2015.
- CHAVES, R. C. P. e LEÃO, F. B. Sistema de Proteção Adaptativo para Redes de Distribuição com Inserção de Geradores Distribuídos. In: XX Congresso Brasileiro de Automática, 2014, Belo Horizonte.
- CHOWDHURY, S.; CHOWDHURY, S. P.; ROSSLEY, P. Microgrids and Active Distribution Networks, 1st ed. London, United Kingdom: *The Institution of Engineering and Technology* - IET, 2009.
- COLANTONI, S.; DELLA GATTA, S.; DE PROSPERIS, R.; RUSSO, A.; FANTOZZI, F.; DESIDERI, U. Gas Turbines Fired With Biomass Pyrolysis Syngas: Analysis

- of the Overheating of Hot Gas Path Components, In: *ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air*. Florida, USA; pp. 389 – 398, 2009
- COSTA, C. R. Condução de Experimentos Computacionais com Métodos Heurísticos. 2011. 150f. Dissertação (Mestrado em Computação), Universidade Federal de Goiás, 2011.
- DA SILVA, F. L. Análise do Desempenho de uma Microrrede com Múltiplas Unidades de Geração Distribuída. 2011. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2011.
- DAL TOÉ, M. C.; RIDER, M. J. Modelo Binível de Preço de Contrato Ótimo Multiestágio da Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição Radiais de Energia Elétrica. Anais do V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE 2014, Foz do Iguaçu - PR, Brasil, 22-25/04/2014.
- DAS, D. A fuzzy multiobjective approach for network reconfiguration of distribution systems. *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 21, pp. 202–209, Jan. 2006.
- DEB, K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. New York: Wiley, 2001.
- DELBEM, A. C. B. ; CARVALHO, A. C. P. L. F. ; BRETAS, N. G. “Main Chain Representation for Evolutionary Algorithm Applied to Distribution System Reconfiguration”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 1, p. 425-436, 2005.
- DELBEM, A. C. B., DE CARVALHO, A. C. P. L. F., POLICASTRO, C. A., PINTO, A. K. O., HONDA, K. E GARCIA, A. C. Node-depth encoding for evolutionary algorithms applied to network design, *GECCO*, pp. 678–687, 2004.
- DEPURU, S.S.S.R.; WANG, L.; DEVABHAKTUNI, V.; GUDI, N. Smart meters for power grid - Challenges, issues, advantages and status. In: *IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition (PSCE)*, Arizona, EUA, p. 1-7, mar. 2011.
- DORIGO, D.; DI CARO, G. The Ant Colony Optimization Meta-Heuristic. *IEEE. New ideas in optimization*, 1470–1477, 1999.
- DORIGO, M.; SOCHA, K. An Introduction to Ant Colony Optimization. T. F. Gonzalez (Ed.), *Approximation Algorithms and Metaheuristics*, *CRC Press*, 2007.

- DUTRA, C. E.; MONTANÉ, F. A. T. Variable neighborhood search e iterated local search aplicados ao problema de rede de transporte rodoviário com carga fracionada. Anais do XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Bento Gonçalves - RS, 2009
- DYER, M. E.; FRIEZE, A. M. A Simple Heuristic for the p-Centre Problem. *Operations Research Letters*, 3(6):285–288, 1985.
- EPE e ONS. Empresa de Pesquisa Energética e Operador Nacional do Sistema Elétrico. Previsões de carga para o Planejamento Anual da Operação Energética 2016 - 2020. 2015 Disponível em <
<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/Boletim%20Tecnico%20ONS-EPE%20-%20Planejamento%20Anual%20ciclo%20%202016-2020.pdf> > Acesso em Janeiro de 2016.
- FELIACHI, F. Control of grid-connected split-shaft microturbine distribute generator. *IEEE Southeastern Symposium On System Theory*, v. 53, 2003.
- FEO, T. A.; RESENDE, M. G. C. Greedy randomized adaptive search. *Procedures. J. of Global Optimization* 6, pg. 109 -133, 1995.
- FRAGA, M. C. P.; SOUZA, S. R.; COELHO, A. M. Uma metodologia hí'brida baseada em colônia de formigas, busca tabu e reconexãopor caminhos aplicada ao problema de roteamento de veículos com janelas de tempo. Anais do IX Encontro de Modelagem Computacional, Belo Horizonte, 2006
- FRAGOMENI, C. e GOELLNER, C. O impacto no meio ambiente pela atividade da geração de ISSN 1413-7038energia elétrica pelo uso de recursos hídricos. *Revista JUSTIÇA DO DIREITO*. v. 23, n. 1, 2010.
- FRAIDENRAICH, N., LYRA, F., Energia Solar: Fundamentos e Tecnologia de Conversão Heliotérmica e Fotovoltaic., Editora Universitária da UFPE, 1995
- FRANCO, J. F.; LAVORATO, M.; RIDER, M. J.; ROMERO, R. An Efficient Implementation of Tabu Search in Feeder Reconfiguration of Distribution Systems. *Proceedings of the 2012 Power Engineering Society General Meeting, paper PGM- 2012GM0915*, pp. 01–08, San Diego, California, USA, July 22-26, 2012.

- GALLO, D., LANDI, C., LANGELLA, R. AND TESTA, A. Iec flickermeter response to interharmonic pollution, *Harmonics and Quality of Power*, 2004. *11th International Conference on*, pp. 489 – 494, 2004.
- GARCIA, V. J. Metaheurísticas multiobjetivo para o problema de restauração do serviço em redes de distribuição de energia elétrica. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP - Campinas, 2005.
- GELLINGS, C. W. *The Smart Grids: Enabling Energy Efficiency and Demand Response*. 1 Ed. Lilburn, GA, EUA: The Fairmont Press Inc, 2009.
- GIL, A. C. *Como elaborar Projetos de Pesquisa*. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- GLOVER, F. Future paths in integer programming and links to artificial intelligence computers and operation research. Vol.13 p. 533-549, 1986.
- GLOVER, F. Tabu Search and Adaptive Memory Programming - Advances, Applications and Challenges. In: Barr, R.; Helgason, R.; Kennington, J., editors, *Interfaces in Computer Science and Operations Research*, p. 1–75. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- GLOVER, F. Tabu Search, Part I - *ORSA Journal on Computing* 1, 1989
- GLOVER, F. Tabu Search, Part II - *ORSA Journal on Computing* 2, 1990.
- GLOVER, F.; LAGUNA, M. *Handbook of Combinatorial Optimization*, 3261-3362, 2013
- GLOVER, F.; LAGUNA, M. *Tabu Search*. Kluwer Academic Publisher, 1997
- GLOVER, J. D.; SARMA, M. S. O. *Power system - analysis e design*. 5 ed. s.l.:Cengage Learning, 2012.
- GOLDEMBERG, J. - The case for renewable energies. Relatório Temático, Secretaria da Conferência Internacional para Energias Renováveis, janeiro de 2004.
- GOLDEMBERG, J. *Energia e desenvolvimento sustentável*. São Paulo: Blucher, 2010.
- GOMES, F. V.; CARNEIRO, S.; PEREIRA, J. L. R.; VINAGRE, M. P.; GARCIA, P. A. N.; ARAUJO, L. R. D. A. New Distribution System Reconfiguration Approach Using Optimum Power Flow and Sensitivity Analysis for Loss Reduction. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, pp. 1616-1623, 2006.

- GÓMEZ-EXPÓSITO, A.; CONEJO, A. J.; CAÑIZARES, C.; Sistemas de Energia Elétrica: Análise e Operação. Rio de Janeiro, ed. LTC, 2011
- GUEDES, L.S.M; LISBOA, A. C.; VIEIRA, D. A. G.; SALDANHA, R. R. Reconfiguração Multiobjetivo de Redes Radiais de Distribuição de Energia Elétrica. Congresso Latino-Iberoamericano de investigación Operativa. Rio de Janeiro, 24 - 28 de setembro, 2012.
- GUERRA, W.; UNSIHUAY-VILA, C.; KAGAN, N. Impacto Da Geração Distribuída Na Reconfiguração De Sistemas De Distribuição De Energia Elétrica Utilizando Busca Em Vizinhança Variável. Anais do XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Ubatuba - SP, 2011
- HELD, M.; KARP, R. M. The Traveling-Salesman Problem and Minimum Spanning Trees. *Operations Research*, 18(6):1138–1162, 1970.
- HERRERA, R. P. Nebulização de Etanol na Entrada do Compressor de uma Microturbina a Gás de 30kW: Análise Termodinâmica e Experimental. 2015. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Itajubá, 2015.
- HOCHBAUM, D. S.; SHMOYS, D. B. A Best Possible Heuristic for the k-Center Problem. *Mathematics of Operations Research*, 10(2):180–184, 1985.
- HODGE, B. K. Sistemas e aplicações de energia alternativa. Rio de Janeiro: LTC, 2011
- HOLLAND, J. Adaptation in natural and artificial systems. Boston: MIT Press, 1992.
- HOLLAND, J. Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press, 1975.
- HOPFIELD, J. J.; TANK, D. W. Neural Computation of Decisions in Optimization Problems. *Biological Cybernetics*, 52(3):141–152, Julho 1985.
- IAB. Instituto Acende Brasil. Qualidade Do Fornecimento De Energia Elétrica: Confiabilidade, Conformidade E Presteza. 14 white paper - o observatório do setor elétrico brasileiro. Edição de Julho de 2014. Disponível em <http://www.acendebrasil.com.br/media/estudos/2014_WhitePaperAcendeBrasil_14_Qualidade_Fornecimento_Energia_Rev_0.pdf> Acesso em Janeiro de 2016.

- IEA. International Energy Agency. Technology Roadmap Energy storage, 2014. Disponível em <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapEnergyStorage.pdf>> Acesso em Janeiro de 2016.
- IMHOFF, J. Desenvolvimento de conversores estáticos para sistemas fotovoltaicos autônomos. 2007. 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Maria, 2007
- INEE. Instituto nacional de eficiencia energetica. O que é geração distribuída. 2013. Disponível em <<http://www.inee.org.br/forumgerdistrib.asp>>. Acesso em Agosto de 2015.
- JIMENEZ, S. M.; HATZIARGYRIOU, N. Research activities in europe on integration of distributed energy resources in the electricity networks of the future. *Proceedings IEEE Power Engineering Society General Meeting*, June 2006.
- JOHNSON, D.; PAPADIMITRIOU, C. I. L. E.; LENSTRA, J.; KAN, A. R.; SHMOYS, D. Performance Guarantees for Heuristics, p. 145–180. John Wiley e Sons Ltd., Chichester(UK), 1985.
- JOSEPH, A. Smart Grid and Retail Competition in India: A Review on Technological and Managerial Initiatives and Challenges. *Procedia Technology*, v. 21, p. 155-162, 2015.
- KAGAN, N.; GOLVEA, M.; MAIA, F. C.; DUARTE, D.; LABRONICI, J.; GUIMARÃES, S. D. Redes elétricas inteligentes no Brasil: análise de custos e benefícios de um plano nacional de implantação. Rio de Janeiro: Sinergia: Abradee; Brasília: Aneel, 2013.
- KAGAN, N.; ROBBA, E. J.; SCHMIDT, H. P. Estimativa de indicadores de qualidade da energia elétrica. Ed. Blucher - São Paulo - SP. ISBN 978-85-212-0487-9, 2009.
- KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220(4598):671–680, 1983.
- KWHANNET, U. Impact of energy storage in micro-grid systems with dgs. *International Conference on Power System Technology*, 2010.
- LASSETER, R. H. Microgrids. Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, 2002.

- LIGHT S.A - LIGHT. O Brasil a um passo do futuro. Saber - Revista de Pesquisa e Desenvolvimento da Light, Rio de Janeiro, n. 02, p. 16-34, 2010.
- LIN, S.; KERNIGHAN, B. W. An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling-Salesman Problem. *Operations Research*, 21(2):498–516, 1973.
- LOPEZ, E.; OPAZO, H.; GARCIA, L.; POLOUJADOFF, M. Minimal loss reconfiguration based on dynamic programming approach: Application to real systems. *Electric Power Components and Systems*, vol. 30 (7), pp. 693-704, 2002.
- LOPEZ, G.; MORENO, J. I.; AMARÍS, H.; SALAZAR, F. Paving the road toward smart grids through large-scale advanced metering infrastructures. *Electric Power Systems Research*, 120, 194-205, 2015.
- LUAN, W. P.; IRVING, M. R.; DANIEL, J. S. Genetic algorithm for supply restoration and optimal load shedding in power system distribution networks. *IEE Pror:- Generation, Transmission and Distribution*, ISSN:1350-2360, v. 149(2)., 2002.
- MACEDO JR., J. R.; SIMONETTI, D. S. L.. Análise de desempenho do flickermeter na presença de componentes inter-harmônicas. *Sba Controle & Automação*. vol.23, n.4, pp. 508-519, ISSN 0103-1759, 2012.
- MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão. *Rev. Virtual Quim.*, ISSN 1984-6835, 7 (1), 126-143, 2015.
- MACIEL, A. C. M.; MARTINHON, C. A.; OCHI, L. S. Heurísticas e metaheurísticas para o problema do caixeiro viajante branco e preto. *Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Gramado-RS, 2005.
- MALDONADO, M. A. R. Desenvolvimento de modelos matemáticos representativos do comportamento dinâmico de microturbinas para a conexão na rede elétrica. 2010. 222F. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010
- MAO, Y.; MIU, K. N. Switch placement to improve system reliability for radial distribution systems with distributed generation. *IEEE Transactions On Power Systems*, v. 18, p. 1346-1352., Novembro 2003.
- MARINHO, E. H. Heurísticas Busca Tabu para o Problema de Programação de Tripulações de Ônibus Urbano. 2005. 90f. Dissertação (Mestrado em Computação). Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2005.

- MARINHO, G. S. P. Apresentação de uma indústria sucroalcooleira sob os conceitos de microrrede de energia elétrica. 2011. 195f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2011.
- MARNAY, C. Microgrids and Heterogeneous Security, Quality, Reliability, and Availability. *Power Conversion Conference*. Nagoya, Japan, April 4, 2007
- MARQUES, J. P. P. T. Modelação e controlo de conversor DC/AC para interligação de Painéis fotovoltaicos À rede. 2009. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- MARQUES, L. T. Restabelecimento de Energia por Reconfiguração de Redes em Sistemas de Distribuição de Grande Porte com Priorização de Chaves, Consumidores e Definição de Sequência de Chaveamento. 2013. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Escola da USP – São Carlos, São Carlos, 2013.
- MARQUES, L. T.; PEREIRA, D. H.; SANCHES, D. S.; DELBEM, A.C.B.; LONDON JR, J. B. A. Metodologias Para Restabelecimento De Energia Com Priorização De Consumidores Especiais Em Sistemas De Distribuição De Grande Porte. XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. ISSN 2358-4483. Fortaleza-CE, 2013.
- MATHIAS NETO, W. P.; MANTOVANI, J. R. S.; LEÃO, F. B. Restauração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica Considerando Geração Distribuída. XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Bento Gonçalves - RS, 30/08 - 03/09, 2010.
- MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Redes Elétricas Inteligentes Diálogo Setorial Brasil-União Europeia em 2014. Projeto Apoio Aos Diálogos Setoriais União Europeia - Brasil. 2015. Disponível em < <http://www.mcti.gov.br/documents/10179/35540/Redes+El%C3%A9tricas+Inteligentes+-+Di%C3%A1logos+Setoriais+Brasil-Uni%C3%A3o+Europeia/1928a060-91ff-48e2-8479-ae590f0fd9a9> > Acesso em Janeiro de 2016.
- MELO, M. S. M. Energia eólica: aspectos técnicos e econômicos. 2012. 154f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético). Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós

- graduação e Pesquisa de Engenharia - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE-UFRJ, 2012.
- MIRANDA, R. F. C. Análise da Inserção de Geração Distribuída de Energia Solar Fotovoltaica no Setor Residencial Brasileiro. 2013. 290 f. Dissertação (Mestrado Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, 2013.
- MLADENOVIC, N.; HANSEN, Variable neighborhood Search. *Computers and Operations Research*, v. 24, p.1097–1100, 1997.
- MME - Ministério de Minas e Energia. Resenha Energética Brasileira: Exercício de 2014. Edição de junho de 2015. Disponível em <
<http://www.mme.gov.br/documents/1138787/1732840/Resenha+Energ%C3%A9tica+-+Brasil+2015.pdf/4e6b9a34-6b2e-48fa-9ef8-dc7008470bf2> > Acesso em Janeiro de 2016.
- MONTEMANNI, R.; GAMBARDELLA, L.; RIZZOLI, A.; DONATI, A. A new algorithm for a dynamic vehicle routing problem based on ant colony system. *Proceedings of ODYSSEUS*, p. 26 - 31, 2003.
- MORAIS, H.; SOUSA, T.; VALE, Z.; FARIA, P. Evaluation of the Electric Vehicle Impact in the Power Demand Curve in a Smart Grid Environment, *Energy Conversion and Management*, vol. 82, pp. 268-282, June 2014, Digital Object Identifier: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.032>.
- MOREIRA, C. C. L. Identification and Development of Microgrids Emergency Control Procedures. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Computação). Universidade do Porto. Porto, Portugal, 2008
- MOREIRA, C. L.; RESENDE, F. O.; PEÇAS LOPES, J. A. Using Low Voltage Microgrids for Service Restoration, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, N°1, pg. 395-403, 2007.
- MOREIRA, H. L. ; SOUZA, S. S. F.; ROMERO, R. Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Radiais Utilizando o Algoritmo Genético Especializado. In: Simpósio de Métodos Numéricos Computacionais - IV SMNC, Curitiba - Paraná, 2014.

- MORETTO, E. M.; GOMES, C. S.; ROQUETTI, D. R.; JORDAO, C. O. Histórico, tendências e perspectivas no planejamento espacial de usinas hidrelétricas brasileiras: a antiga e atual fronteira Amazônica. *Ambient. Soc.* vol.15, n.3 pp. 141-164, ISSN 1809-4422, 2012.
- MOURA, P. S., LÓPEZ, G. L., MORENO, J. I., & DE ALMEIDA, A. T. The role of Smart Grids to foster energy efficiency. *Energy Efficiency*, 6(4), 621-639, 2013.
- NATALE, F. *Automação Industrial*. Editora Érica, ISBN 8571947074, 2005.
- NEMA. National Electrical Manufacturers Association. Levels of intelligence . white paper., 2009. Disponível em: <<http://www.nema.org/Policy/Energy/Smartgrid/Documents/Levels>>. Acesso em Nov. 2015
- NETL - *National Energy Technology Laboratory*. The Transmission Smart Grid Imperative. Developed for the U.S. Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, 2009. Disponível em <http://www.netl.doe.gov/File%20Library/research/energy%20efficiency/smart%20grid/whitepapers/The-Transmission-Smart-Grid-Imperative_2009_09_29.pdf> Acesso em Janeiro 2016.
- NIST - *National Institute of Standards and Technology*. Special Publication 1108 – NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards. Release 1.0, 2010. Disponível em <http://www.nist.gov/public_affairs/releases/upload/smartgrid_interoperability_final.pdf> Acesso em Janeiro de 2016.
- NOMURA, S.; SHINTOMI, T.; AKITA, S.; NITTA, T.; SHIMADA, R.; MEGURO, S. Technical and Cost Evaluation on SMES for Electric Power Compensation, *Applied Superconductivity*. IEEE Transactions on , vol.20, o.3, pp.1373- 1378, June, 2010.
- OLIVEIRA, L. W. Sandoval C. J.; Costa, J. S.; de Oliveira, E. J.; Pereira, J. L. R.; Ivo, C. S. J. Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição para minimização de perdas de energia. *Sba Controle & Automação*, Natal , v. 20, n. 2, p. 233-246, June 2009 .

- ONWUNTA, O. E. K.; KAHN, M. T. E. Smart Grid Concept and Developments: The Relevance to South Africa. *Journal of Energy and Power Engineering*, v. 8, n. 11, 2014.
- PÁDUA S. G. B. DE; COSSI A. M.; MANTOVANI J. R. S.; Planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica de média tensão através de um algoritmo de Busca Dispersa. In: *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional - SBPO, 2013, Natal-RN*.
- PDR - Programa Brasileiro de Redes Inteligentes. 2015. Disponível em <<http://redesinteligentesbrasil.org.br/o-projeto.html>> Acesso em Dez. 2015
- PEDREIRA, A. S. D. L. Predição de interações proteína-proteína através de cobertura de conjuntos utilizando uma metaheurística GRASP. 2012. 68f. Dissertação (Mestrado em Computação), Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2012
- PEREIRA JUNIOR, B. R.; COSSI, A. M.; MANTOVANI, J. R. S. Proposta De Uma Metodologia Baseda Em Busca Tabu Para Restauração Automática De Sistemas De Distribuição De Energia Elétrica XIX Congresso Brasileiro De Automática-Campina Grande, 1204-1211, 2012.
- PEREIRA, A. L.; CHAVES, G. de L. D.; CELESTE, W. C.; COURA, D. J. C. Estudo dos instrumentos de política para promoção das redes inteligentes de energia. *Anais do XXIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Foz do Iguaçu - PR, Brasil, 18-21/10/2015*.
- PEREIRA, A. L.; COURA, D. J. C.; CELESTE, W. C. - Utilização da Metaheurística GRASP como Solução para o Problema de Reconfiguração de Redes Inteligentes de Energia. In: *Congresso Sul Brasileiro de Computação, 2014, Criciúma. VII Sulcomp, 2014*.
- PEREIRA, D. S. Avaliação de Desempenho de Protótipo de Seguimento Solar Passivo Biaxial. 2015. 60f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia e Ambiente). Universidade de Lisboa, 2015.
- PERIUS, M. R.; BONFIM, J. Pequenas centrais hidrelétricas como forma de redução de impactos ambientais e crises energéticas. *Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde*, vol. 16, núm. 2, 2012, pp. 135-150 Universidade Anhanguera Campo Grande, Brasil

- PERLES, C. E. Propriedades físico-químicas relacionadas ao desenvolvimento de membranas de Nafion para aplicações em células a combustível do tipo PEMFC. *Polímeros*, vol.18, no.4, p.281-288. ISSN 0104-1428, 2008.
- PHAM, T. T. H.; BÉSANGER, Y.; HADJSAID, N. New challenges in power system restoration with large scale of dispersed generation insertion. *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 24, n° 1, pp.398 - 406, February 2009.
- PINTO, M. O. *Energia Elétrica : Geração, Transmissão e Sistemas Interligados*. 1 Edição - Rio de Janeiro: LTC, pg. 22, 2014a.
- PINTO, M. O. *Fundamentos de energia eólica*. 1 Edição - Rio de Janeiro: LTC, pg. 165, 2014b.
- PIZZOLATO, N. D.; GANDOLPHO, A. A. *Técnicas de Otimização*. 1° Edição, LTC : Rio de Janeiro, 2013
- POSSAGNOLO, L. H. F. M.; FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; ROMERO, R. Operação Ótima de Sistemas de Armazenamento de Energia em Smart Grids com Fontes Renováveis. In: XX Congresso Brasileiro de Automática, 2014, Belo Horizonte, Minas Gerais.
- RAHMANI, M.; PARDALOS, P.; ROMERO P.; RIDER, M. J. Transmission Expansion Planning under Smart Grid Paradigm. *Proceedings of the 2013 Smart Grid Challenges*, University of Arizona, Tucson, AZ, USA, March 21-23, 2013.
- RESCCM - Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. 2012. Disponível em <<http://srren.ipcc-wg3.de/report/srren-figures-chapter-05/srren-figure-05.02.png>>. Acesso em janeiro 2016.
- RIBEIRO FILHO, G; NAGANO, M. S.; LORENA, L. A. N. Hybrid evolutionary algorithm for flowtime minimisation in no-wait flowshop scheduling. *MICAI 2007: Advances in Artificial Intelligence*, 1099-1109, 2007
- RIVERA, R.; ESPOSITO, A. S.; TEIXEIRA, I. Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local. *Revista do BNDES* 40, p. 43-84, dezembro 2013.
- ROMANO, R. M. ; GASPAR, L. L. A. ; GUEDES, L. S. M. ; LISBOA, A. C. ; VIEIRA, D. A. G. . Ferramenta Multicritério para Reconfiguração de Redes Radiais de

- Distribuição de Energia Elétrica. In: Congresso de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica, 2013, Rio de Janeiro. VII CITENEL, p. 1-12, 2013.
- ROMERO, E.; GÓMEZ, A.; RIQUELME, J.; LLORENS, F. Path-Based distribution network modeling: Application to reconfiguration for Loss Reduction. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.20, n.2, May 2005.
- ROMERO, M. E. V. Alocação de Chaves para Transferências Automáticas de Cargas entre Subestações Utilizando Algoritmo Busca Tabu Reativa, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho". Programa de Pos Graduação em Engenharia Elétrica, Ilha Solteira, São Paulo, 2009.
- ROSA, L. P. Geração hidrelétrica, termelétrica e nuclear. *Estud. av.*, vol.21, n.59 pp. 39-58, ISSN 1806-9592, 2007.
- ROSEMBACK, R. H. Conversor CC-CC Bidirecional Buck-Boost atuando como Controlador de Carga de Baterias em um Sistema Fotovoltaico. 2004. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Juiz de Fora, 2004.
- ROSSETI, G. J. S.; EDIMAR, J. O.; OLIVEIRA, L. W. Algoritmo Para Reconfiguração E Procedimentos De Operação De Sistemas De Distribuição De Energia Elétrica Utilizando FPO. *Anais do XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Porto de Galinhas, PE, 2015
- ROTHFARB, B.; FRANK, H.; ROSENBAUM, D. M.; STEIGLITZ, K.; KLEITMAN, D. J. Optimal Design of Offshore Natural-Gas Pipeline Systems. *Operations Research*, 18(6):992-1020, 1970.
- SALAZAR, H.; GALLEGO, R.; ROMERO, R. Artificial neural networks and clustering techniques applied in the reconfiguration of distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 21, n. 3, p. 1735-1742, 2006.
- SANCHES, D. S.; SOARES, T. W. L.; LONDON Jr., J.B. A.; DELBEM, A. C. B.; PRADO, R. S.; GUIMARÃES, F. G. . Multi-objective Evolutionary Algorithm with Discrete Differential Mutation Operator for Service Restoration in Large-scale Distribution Systems. In: 8th International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization, 2015, Guimarães. Part II Series: Lecture Notes in Computer Science, Vol. 9019, 2015. p. 498-513.

- SANTOS, A. P. P. Thermodynamic analysis of gás turbine cycle using inlet air cooling methods. 2012. 104f. Dissertação (Mestrado em Aerodinâmica, Propulsão e Energia) Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Jose dos Campos, 2012.
- SCHMIDT, H. P., IDA, N., KAGAN, N. E GUARALDO, J. C. Fast Reconfiguration of Distribution Systems Considering Loss Minimization, *IEEE Transactions on Power Systems*, 20, 1311-1319, 2005
- SEDANO, E. C. Restauração de redes de distribuição de energia elétrica usando algoritmo de busca tabu reativa. 2005. 81 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica), Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.
- SEDANO, E. C.; SILVA, L. G. W.; FELTRIN, A. P.; MANTOVANI, J.R.S. Restauração De Redes De Distribuição De Energia Elétrica Usando Algoritmo De Busca Tabu Reativo. XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 27- 30/09, Gramado -RS, 2005.
- SEGUEL, J. I. L. Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital. 2009. 222f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Minas Gerais, 2009
- SILVA, G. P. Restauração de Redes de Energia utilizando Algoritmos Genéticos Multiobjetivo. 2014. 88f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizinte, 2014
- SILVA, L. G. W., PEREIRA, R. A. F. E MANTOVANI, J. R. S. Alocação e Realocação de Chaves para Restauração de Redes de Distribuição utilizando Algoritmo de Busca Tabu Dedicado, XV CBA - Congresso Brasileiro de Automática, Gramado, Rio Grande do Sul, Brasil, pp. 1-6, 2004.
- SILVA, M. S. da *et al* . QoS management in smart grids: a Markovian approach.J. Microw. Optoelectron. Electromagn. Appl., São Caetano do Sul , v. 13, n. 2, p. 122-138, Dec. 2014.
- SILVA, R.; CHIQUITO, A. J.; SOUZA, M. G.; MACEDO, R. P.. Células solares "caseiras". Rev. Bras. Ensino Fís. ISSN 1806-9126, vol.26, n.4, pp. 379-384, 2004.
- SIOSHANSI, F. P. Integrating renewable, distributed & e_icient energy. *Academic Press - Elsevier*, 2012.

- SOUZA, A. R. R. Conexão de Geração Distribuída em Redes de Distribuição. 2009. 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2009.
- SOUZA, E. S. Propostas de modelagem matemática para o problema de restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica radiais. 2014. 167 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia, 2014.
- SOUZA, S. S. F ; LAVORATO, M. ; ROMERO, R. . Análise De Índices De Sensibilidade Da Metaheurística Grasp Aplicada Ao Problema De Reconfiguração De Sistemas De Distribuição De Energia Elétrica. In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI, 2013.
- SOUZA, S. S. F. Algoritmo Grasp Especializado Aplicado Ao Problema De Reconfiguração De Alimentadores Em Sistemas De Distribuição Radial. 2013. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho, Ilha Solteira, SP, 2013
- SOUZA, S. S. F.; LAVORATO, M.; ROMERO, R. GRASP especializado aplicado ao problema de reconfiguração de sistemas de distribuição. *Sixth IEEE/PES transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA)*, Montevideo, p. 1-6, 2012.
- SOUZA, S. S. F.; ROMERO, R. Algoritmo Imunológico Artificial Opt-Ainet Aplicado A Reconfiguração De Sistemas De Distribuição Considerando Demandas Variáveis. Anais do XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Porto de Galinhas, PE, 2015.
- SOUZA, S. S. F.; ROMERO, R. Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Usando um Algoritmo Imunológico Artificial CLONALG. Congresso Brasileiro de Automática, pp. 2137-2144, 2014.
- TALUKDAR, S. N.; SOUZA, P. S. Scale Efficient Organizations. In: Systems, Man and Cybernetics, 1992., *IEEE International Conference on*, p. 1458–1463 vol.2, 18-21, 1992.
- TOLEDO, F. *et al.*, Desvendando as Redes Elétricas Inteligentes: Smart Grid Handbook, Rio de Janeiro, 2012.

- TOLMASQUIM, T. M. Geração de energia elétrica. Rio de Janeiro: Interciência: CINERGIA, 2005
- TURKSON, J.; WOHLGEMUTH, N. "Power Sector Reform and Distributed Generation in sub - Saharan Africa Energy Policy 29: 135-145, 2001.
- VANDERLINDE, J. B.; GONÇALVES, R. R.; RIDER, M. J. Planejamento em Curto Prazo da Expansão de Sistemas de Distribuição Usando uma Formulação Cônica. In: XX Congresso Brasileiro de Automática 2014 (CBA 2014), Belo Horizonte - MG, Brasil, 2014.
- WENDT, Hartmut; GOTZ, Michael and LINARDI, Marcelo. Tecnologia de células a combustível. Quím. Nova, vol.23, n.4, pp. 538-546, ISSN 1678-7064, 2000
- WHITAKER, C. Renewable systems interconnection study : Distributed photovoltaic systems desing and tecnology requirements. *P. Sandia National Laboratories, 2008. U.S. Department of Energy, 2008.*
- ZAN, J. C. ; MARQUES, L. T. ; COIMBRA, A. M. ; PEREIRA, D. H. ; SILVA, M. ; BENTO, C. R. C. ; GOIS, A. M. ; LONDON Jr., J.B. A. . Restabelecimento de energia em sistemas de distribuição de grande porte considerando bancos de capacitores e reguladores de tensão. In: XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2015, Natal. Anais (Artigo SBAI_2015_submission_283; 6 páginas), 2015.
- ZILLES, R.; OLIVEIRA, S. H. F.; BURANI, G. F. Distributed Power Generation with Photovoltaic Systems at USP. *IEEE/PES T&D 2002 Latin America Conference.* 18 - 22 de Março de 2002 Centro de Convenções Anhembi, São Paulo, 2002.
- ZVIETCOVICH, W. G. Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando a metaheurística busca em vizinhança variável. 2006. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2006