

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E  
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

DANIEL ALEXANDRE OLEINIK

**Bypass Seletivo de Nós (BSN) - Usando Algoritmos Genéticos para  
Reduzir Latência em Smart Grid**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2020

DANIEL ALEXANDRE OLEINIK

**Bypass Seletivo de Nós (BSN) - Usando Algoritmos Genéticos para  
Reduzir Latência em Smart Grid**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau “Mestre em Ciências” - Área de Concentração: Telecomunicações e Redes.

Orientador: Mauro Sergio Pereira Fonseca

**CURITIBA**

**2020**

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Oleinik, Daniel Alexandre

*Bypass* Seletivo de Nós (BSN) - Usando algoritmos genéticos para reduzir latência em *Smart Grid* [recurso eletrônico / Daniel Alexandre Oleinik. -- 2020.

1 arquivo eletrônico (61 f.) : PDF ; 934 KB.

Modo de acesso: World Wide Web.

Texto em português com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Área de Concentração: Telecomunicações e Redes, Curitiba, 2020.

Bibliografia: f. 60-61.

1. Engenharia elétrica - Dissertações. 2. Redes elétricas inteligentes. 3. Chaveamento óptico. 4. Comunicações ópticas. 5. Fibras ópticas. 6. Comutação de pacotes (Transmissão de dados). 7. Topologia de redes elétricas. 8. Computação evolutiva. 9. Algoritmos genéticos. 10. TCP/IP (Protocolo de rede de computação). 11. Interconexão de redes (Telecomunicações). 12. Geração distribuída de energia elétrica. 13. Métodos de simulação. I. Fonseca, Mauro Sergio Pereira, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD: Ed. 23 -- 621.3

**Biblioteca Central do Câmpus Curitiba - UTFPR**  
**Bibliotecária: Luiza Aquemi Matsumoto CRB-9/794**

## TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO

A Dissertação de Mestrado intitulada “**BSN – Usando Computação Evolucionar para reduzir latência em Smart Grid**” defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) **Daniel Alexandre Oleinik**, no dia **28 de novembro de 2019**, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Ciências, área de concentração **Telecomunicações e redes**, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Alexandre de Almeida Prado Pohl – UTFPR

Profa. Dra. Ana Cristina Barreiras Kochem Vendramin – UTFPR

Profa. Dra. Anelise Munaretto Fonseca – UTFPR

Prof. Dr. Carlos Marcelo Pedroso – UFPR

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 28 de novembro de 2019.

*“Muito melhor é o homem paciente que o guerreiro, mais vale controlar as emoções e os ímpetos do que conquistar toda uma cidade!”*

---

Provérbios 16:32

## RESUMO

OLEINIK, Daniel Alexandre. Bypass Seletivo de Nós (BSN) - Usando Algoritmos Genéticos para Reduzir Latência em Smart Grid. 62 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

O crescente consumo de energia proveniente de fontes não renováveis e finitas vem incentivando o avanço no desenvolvimento e utilização de novas opções de geração de energia. Estas opções, quando incorporadas ao sistema atual de geração e distribuição de energia elétrica, devem incluir novas exigências do sistema de comunicação motivando o desenvolvimento de redes elétricas inteligentes ou *Smart Grid* (SG). O presente documento propõe um método para otimização de uma rede de topologia em malha com enlaces em fibra óptica. Essa otimização é alcançada através de alterações das conexões físicas da rede em conjunto com uma gerência reativa inteligente.

**Palavras-chave:** *Smart Grid*, Chaveador óptico, Redes IP, Redes em Malha, Otimização, Algoritmos Genéticos

## ABSTRACT

OLEINIK, Daniel Alexandre. NODE SELECTIVE BYPASS (NSB) - USING GENETIC ALGORITHMS TO REDUCE LATENCY IN SMART GRID. 62 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

The increasing consumption of energy from nonrenewable and finite sources is encouraging the advance of development and use of new energy generation options. These options, when incorporated into the current electricity generation and distribution system, should demand new requirements from the communication system, motivating the development of Smart grid. This document proposes a method to improve and optimize the network or grid access, built with optic fiber and mesh topology, through the handling of physical connections in the network and a smart reactive management.

**Keywords:** *Smart Grid, Optical Switch, IP networks, Mesh networks, Optimization, Genetic Algorithms*

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Tipos básicos de topologia .....	14
FIGURA 2	– Exemplo de rede de comunicação .....	16
FIGURA 3	– Exemplo básico de OXC óptico .....	18
FIGURA 4	– Exemplo básico chaveador óptico .....	19
FIGURA 5	– Tipos básicos de grafos .....	20
FIGURA 6	– Busca em Profundidade vs Largura .....	21
FIGURA 7	– Latência de Link .....	29
FIGURA 8	– Exemplo de atuação de <i>by-pass</i> óptico .....	30
FIGURA 9	– Exemplo de funcionamento do BSN .....	32
FIGURA 10	– Fluxograma do BSN .....	34
FIGURA 11	– Rede exemplo após BSN .....	38
FIGURA 12	– Exemplo de <i>Crossover</i> .....	39
FIGURA 13	– Diagrama em blocos do Gerador de Topologias .....	42
FIGURA 14	– Fluxograma do Gerador de Topologias .....	43
FIGURA 15	– Tipos comuns de cruzamento .....	45
FIGURA 16	– Distribuição de probabilidade .....	46
FIGURA 17	– Melhoria de custo máximo com grau 3 .....	48
FIGURA 18	– Melhoria de custo máximo com grau 4 .....	48
FIGURA 19	– Melhoria de custo máximo com grau 5 .....	49
FIGURA 20	– Limites de melhoria alcançados .....	49
FIGURA 21	– Melhoria de custo x valência .....	50
FIGURA 22	– Melhoria de custo x tamanho de rede .....	51
FIGURA 23	– Quantidade de Ramos x Custo .....	52
FIGURA 24	– Custos dos Ramos em uma Rede .....	53
FIGURA 25	– Custo antes e depois do BSN .....	54
FIGURA 26	– Multiplicidade de chaveadores ópticos .....	56

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1	–	Comparação entre grades normal e <i>Smart</i> .....	23
TABELA 2	–	Tempos de resposta em redes <i>Smart Grid</i> .....	24
TABELA 3	–	Biologia x BSN .....	26
TABELA 3	–	Exemplo de cálculo de custo total em rede .....	37
TABELA 4	–	Cromossomo BSN .....	38
TABELA 5	–	“ <i>Roulette Wheel</i> ” .....	40
TABELA 6	–	Parâmetros do BSN .....	42

## LISTA DE SIGLAS

SG	<i>Smart Grid</i>
DG	Distributed Generation
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
AP	Access Point
OXC	Optical Cross Connect
OEO	Optical-Electrical-Optical
BFS	<i>Breadth-First Search</i>
DFS	<i>Depth-first search</i>
STP	<i>Spanning Tree Protocol</i>
RSTP	<i>Rapid Spanning Tree Protocol</i>
BPDU	Bridge Protocol Data Units
TEPCO	<i>Tokyo Electric Power Company</i>
IA	Inteligência Artificial
AI	<i>Artificial Intelligence</i>
CE	Computação Evolucionária
AG	Algoritmos Genéticos
BSN	<i>“Bypass Seletivo de Nós”</i>
SLA	<i>Service Level Agreement</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
1.1	MOTIVAÇÃO	11
1.2	OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.3	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	12
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>13</b>
2.1	INTERCONEXÃO EM REDES	13
2.2	TECNOLOGIA DE TRANSMISSÃO	15
2.3	COMUTADORES ÓPTICOS	15
2.4	GRAFOS	19
2.4.1	Algoritmo de Dijkstra	21
2.4.2	Algoritmo de Prim	22
2.4.3	Algoritmo de Busca de Custo Uniforme	22
2.4.4	Spanning Tree Protocol	22
2.5	<i>SMART GRIDS</i> DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA	23
2.6	COMPUTAÇÃO EVOLUCIONÁRIA E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	25
2.6.1	Algoritmos Genéticos	26
<b>3</b>	<b>BSN - BYPASS SELETIVO DE NÓS</b>	<b>29</b>
3.1	ESTUDO DE CASO	31
3.2	ALGORITMO PROPOSTO	31
3.2.1	Custo da rede	36
3.2.2	Representação	37
3.2.3	Função de <i>Fitness</i>	38
3.2.4	<i>Crossover</i>	39
3.2.5	Seleção	40
3.2.6	Dimensão das Populações	40
3.2.7	Parâmetros Adotados	41
3.3	GERADOR DE TOPOLOGIAS	42
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>47</b>
4.1	ANÁLISE DE CUSTO TOTAL	47
4.2	ANÁLISE DE CUSTO INDIVIDUAL	52
4.3	DISCUSSÕES	55
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>58</b>
5.1	TRABALHOS FUTUROS	60
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>61</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de combustíveis fósseis, o aquecimento global e o aumento da população mundial, que reflete-se no aumento na demanda por energia, têm se tornado tópicos cada vez mais importantes no cenário global. Estes fatos têm acelerado o desenvolvimento de fontes renováveis de energia, como a eólica ou solar, que prometem causar menos impactos ambientais. A integração dessas novas fontes de energia aos sistemas existentes de distribuição e transmissão, demanda a existência de uma nova grade de comunicação que ofereça uma infraestrutura mais rápida, eficiente e confiável (Gungor et al., 2013).

Ainda segundo Gungor et al. (2013), as tecnologias de energia renovável possuem certa tendência natural de instalação não centralizada. Exemplos disso são os geradores que se utilizam de células fotovoltaicas e os geradores eólicos, já que ambos aproveitam-se de características geográficas e/ou climáticas. Ao considerar o sistema de distribuição de energia atual é fácil perceber que ele foi construído para o escoamento de energia proveniente de um sistema de geração altamente centralizado. Obviamente isto não significa que exista apenas um ponto de geração de energia, mas sim que eles são pontuais. Logo, a inserção destas tecnologias geradoras de energia renovável devem transformar o sistema de distribuição de energia atual em um grande sistema de geração distribuída de energia, tornando-se imperativa a utilização de uma infraestrutura capaz de suprir as necessidades de comunicação demandadas pela variedade de sensores, atuadores e elementos utilizados no controle desta nova rede de geração e distribuição de energia. O que, em resumo, representa o próprio conceito de *Smart Grid* (SG).

Este conceito de infraestrutura refere-se a uma completa modernização no sistema de energia visando monitorar, proteger e otimizar a operação dos elementos utilizados na rede. Englobam-se aqui os elementos desde os mais básicos como os presentes em residências e utilizados por consumidores finais, até os mais críticos como os elementos geradores/armazenadores de energia ou aqueles presentes nas redes de alta tensão (Sood et al., 2009).

Este novo cenário de Geração Distribuída de energia (DG - Distributed Generation) viabiliza a aplicação de novos métodos na análise e resolução de problemas na rede de

distribuição e na segurança/estabilidade da mesma, como a utilização de metodologias de recuperação automática em caso de falhas (*Self Healing*) por exemplo (Amin, 2001). Mas para isso, além da existência de uma rede de comunicação inteligente ou SG, também faz-se necessário o atendimento de requisitos específicos de comunicação (Sood et al., 2009).

O SG necessita de grande flexibilidade para permitir a adição de serviços cada vez mais variados e com diferentes requisitos de comunicação, como monitoramento de sensores em tempo real e interação com atuadores e usuários finais (Aggarwal et al., 2010). Sabe-se que uma rede TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) deve atender, com elevado grau de satisfação, os requisitos de comunicação demandados (Lobo et al., 2008). Requisitos estes que, segundo Aggarwal et al. (2010), devem ser substancialmente consideráveis tanto em largura de banda quanto em valores de latência, justificando facilmente o uso de um meio físico como a fibra óptica assim como qualquer tentativa de redução de latência.

O presente trabalho apresenta resultados de simulações quanto à utilização de chaveadores ópticos em pontos estratégicos da rede (considerando uma infraestrutura de rede construída com fibras ópticas) buscando *by-passar* equipamentos sem prejudicar nenhuma comunicação, enfatizando a redução da latência de rede.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

As redes SG devem propiciar a utilização e o surgimento de diversos novos serviços que, potencialmente, servirão como porta para entrada de novas tecnologias no dia-a-dia da sociedade. Dessa forma, pode-se imaginar que os requisitos demandados das redes de comunicação, base das SG, sejam cada vez mais exigidos. Neste sentido qualquer esforço realizado para otimização dessas redes, e consequente diminuição de latência ou aumento de largura de banda, são bem-vindos.

Através da utilização de chaveadores ópticos estrategicamente posicionados em uma rede, potencialmente mas não necessariamente IP, pode-se maximizar a performance da mesma em termos de latência. Os chaveadores ópticos, se empregados conforme proposto no presente documento, podem diminuir o número de equipamentos pelos quais os dados devem passar até chegar ao seu destino, otimizando a rede em questão. Sendo que para isto, faz-se necessária a criação de uma metodologia específica para seleção e ativação dos mesmos.

## 1.2 OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo geral deste trabalho é propor uma metodologia eficiente para redução de latência através da alteração física da topologia de rede, advinda da utilização de chaves ópticas estrategicamente posicionadas e acionadas dinamicamente.

Os objetivos específicos são:

- Comparar as necessidades em termos de comunicação entre as redes de distribuição de energia atuais e as futuras redes inteligentes;
- Elaborar e apresentar uma metodologia de redução de latência baseada na alteração dinâmica da estrutura física da rede através da utilização de chaveadores ópticos;
- Realizar simulações com diversas topologias de rede visando a obtenção de métricas de desempenho da metodologia proposta;
- Apresentar os resultados obtidos nas simulações realizadas.

## 1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O presente documento está dividido em capítulos com o objetivo de simplificar o entendimento do mesmo assim como de seu conteúdo. O Capítulo 2 contém a fundamentação teórica básica de diversos conceitos necessários para o correto entendimento da proposta, que por sua vez é apresentada no Capítulo 3, juntamente com as explicações necessárias para o entendimento do trabalho. O Capítulo 4 mostra os resultados obtidos e, por fim, o Capítulo 5 traz as conclusões alcançadas assim como algumas sugestões de trabalhos futuros seguido pelas referências bibliográficas utilizadas na elaboração deste documento.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta conceitos utilizados no desenvolvimento do trabalho e, portanto, necessários para o correto entendimento do mesmo. Os tópicos aqui abordados são, quando necessários, direcionados ao objetivo final do trabalho e por isso podem não representar o universo do conhecimento sobre seu respectivo assunto.

### 2.1 INTERCONEXÃO EM REDES

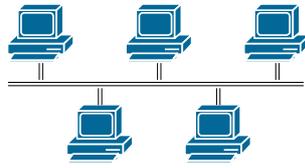
Existem diversas formas de realizar a interconexão entre *hosts* (dispositivos finais ou *endpoints*). A topologia da rede depende de como esta interconexão é realizada. De maneira geral, podem-se destacar como mais comuns as topologias em barramento, anel, estrela, árvore e malha, conforme representado na Figura 1.

Uma topologia em barramento compartilha um mesmo meio para diversos *hosts*. Todas as vezes que um deles deseja enviar alguma informação, todos os equipamentos a recebem mas apenas o destinatário final a utiliza. Visto que o meio de comunicação é compartilhado, faz-se necessário existir alguma política de controle de acesso ao meio, prevenindo que mais de um *endpoint* envie dados ao mesmo tempo, o que poderia gerar uma “colisão” embaralhando os dados de ambas as fontes. Este controle fica sob responsabilidade do protocolo de comunicação utilizado. A Figura 1a representa uma rede conectada em barramento, onde que o barramento central é compartilhado entre os diversos dispositivos conectados.

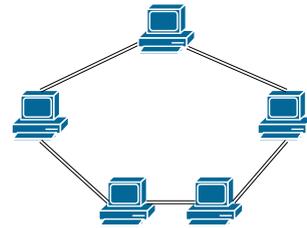
Na topologia em anel os *hosts* são conectados através de um *link* ou enlace fechado, criando um anel. Cada estação é responsável por receber os dados em uma porta e encaminhá-los à outra até que este alcance seu destino. Neste tipo de topologia as colisões de dados são menos frequentes, visto que cada segmento do enlace é estabelecido entre apenas dois *hosts*. Em contrapartida, o protocolo utilizado precisa tratar a dinâmica de recepção e retransmissão de dados entre todos os enlaces. Este tipo de rede fornece redundância já que as mensagens trocadas podem ser enviadas por mais de um caminho (sentido horário ou sentido anti-horário). A Figura 1b representa uma rede em anel, onde todos os equipamentos fazem parte da rede e

**Figura 1** – Tipos básicos de topologia

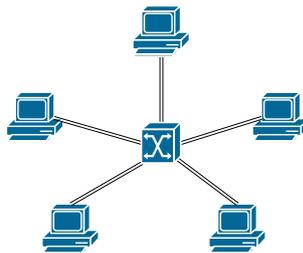
(a) Topologia em barramento.



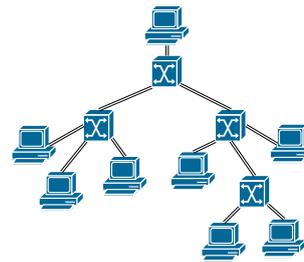
(b) Topologia em anel.



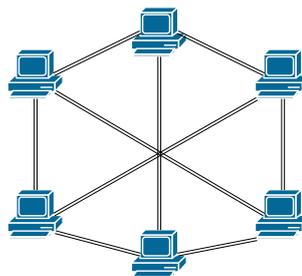
(c) Topologia em estrela.



(d) Topologia em árvore.



(e) Topologia em malha

**Fonte: Autoria Própria.**

precisam repetir os dados recebidos para os demais.

A topologia estrela é muito utilizada em redes sem fio, visto que de maneira geral, todos os *hosts* estão conectados a um ponto de acesso ou AP. Esse tipo de rede também pode ser facilmente encontrada em um meio cabeado, como no caso da utilização dos roteadores/switches residenciais, onde todos os *hosts* são conectados a um mesmo equipamento responsável pela criação de uma LAN e interconexão com uma WAN (KUROSE; ROSS, 2013). A Figura 1c representa uma rede de topologia estrela, neste tipo de topologia todos os equipamentos estão ligados a um nó central, neste caso um *switch* ou comutador (TANENBAUM, 2002).

A topologia em árvore, talvez a mais recorrente em redes de computadores, é assim chamada pois pode ser reconhecida pelo seu aspecto, onde o nó central representa a base da árvore e os diversos *hosts* representam suas folhas (normalmente representada como uma árvore invertida). Basicamente trata-se de uma estrutura hierárquica de conexão entre várias redes e/ou sub-redes. A Figura 1d ilustra esse tipo de topologia. Percebe-se que a topologia assemelha-se

à interconexão de várias sub-redes através de equipamentos dedicados.

A topologia em malha por sua vez, é caracterizada pela criação de uma rede altamente interconectada, podendo formar diversos caminhos redundantes para a interligação entre a origem e o destino das mensagens. Essa redundância confere a este tipo de rede um elevado grau de disponibilidade, visto que mesmo em caso de falha de equipamentos ou da infraestrutura, a comunicação não é necessariamente comprometida. A Figura 1e ilustra uma rede em malha. É possível notar que existem diversas rotas redundantes devido aos vários enlaces estabelecidos entre os equipamentos da rede. Da mesma forma, nota-se que neste tipo de topologia de rede existem custos atrelados ao roteamento, encaminhamento e processamento de pacotes já que, excluindo-se a situação em que o ponto origem e o destino da comunicação sejam vizinhos (diretamente ligados um ao outro), será invariavelmente necessário o encaminhamento de pacotes por parte de nós intermediários para o estabelecimento da comunicação.

## 2.2 TECNOLOGIA DE TRANSMISSÃO

A tecnologia de transmissão está diretamente ligada ao meio físico utilizado, que não precisa ser necessariamente construído em cabos metálicos. Podem ser utilizadas fibras ópticas, enlaces de micro-ondas, ondas infravermelhas, satélites de comunicação, entre outros (TANENBAUM, 2002).

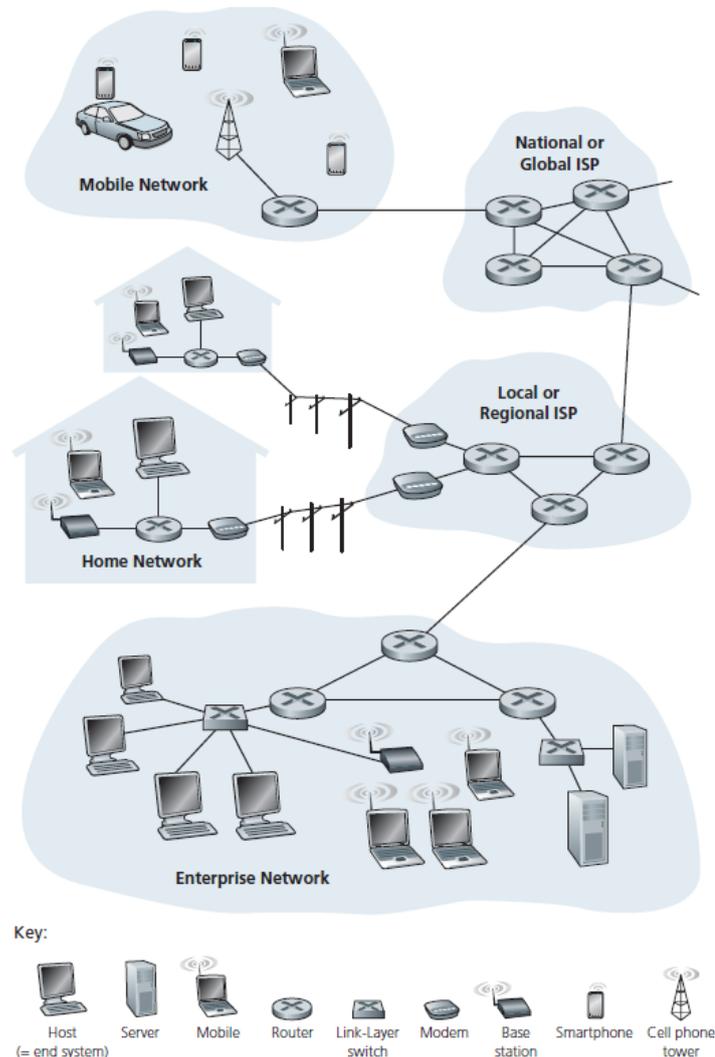
Além disso, as redes de computadores podem ser criadas através da interconexão de redes híbridas, ou seja, diferentes sub-redes criadas com tecnologias de transmissão distintas. Essas redes por sua vez têm diferentes taxas de transmissão e valores típicos de latência e demais parâmetros aos quais todos os pacotes que as atravessarem estarão submetidos (KUROSE; ROSS, 2013) como pode-se verificar no exemplo da Figura 2.

Logo, quando é necessário realizar uma comunicação entre *hosts* em redes que utilizam tecnologias de transmissão diferentes, algum tipo de mecanismo para regulação da velocidade de transferência de informação, assim como políticas de garantia de entrega dos dados devem ser utilizados. Estes mecanismos são algumas das responsabilidades básicas dos protocolos de comunicação como o TCP/IP (KUROSE; ROSS, 2013).

## 2.3 COMUTADORES ÓPTICOS

A comunicação em redes ópticas é feita através da modulação de sinais luminosos, sendo que cada um desses sinais possui uma frequência diferente (usualmente também chamada de cor do sinal) o que implica em diferentes comprimentos de onda ( $\lambda$ ). Redes

**Figura 2** – Exemplo de rede de comunicação. Pode-se notar a presença de redes de diferentes tamanhos, topologias e tecnologias de transmissão.



**Fonte: (KUROSE; ROSS, 2013)**

complexas e com grande número de  $\lambda$ s, como as redes ópticas atuais, possuem em seus nós centrais equipamentos conhecidos como comutadores ópticos, também chamados de OXC (RAMASWAMI et al., 2009).

Segundo Ramaswami et al. (2009) os OXCs podem realizar a comutação interna de sinais de maneira puramente óptica, puramente elétrica (normalmente utilizando um *switch fabric*) ou até mesmo híbrida, sendo desta forma um elemento chave na criação de redes ópticas reconfiguráveis.

De maneira geral um OXC proporciona as seguintes funções chave (RAMASWAMI et al., 2009):

- **Provisionamento de serviço:** um OXC pode ser utilizado em uma grande rede óptica

para provisionar caminhos ópticos de maneira automatizada. Essa capacidade torna-se especialmente importante quando é necessário lidar com grande número de comprimentos de onda em um mesmo nó ou com um grande número de nós na mesma rede.

- **Proteção:** contornar problemas como rompimento de fibras na rede é uma das funções mais esperadas em um OXC visto que ele possibilita a criação de novas rotas ópticas.
- **Transparência de taxa de bit:** a capacidade de lidar com sinais de diferentes taxas de bit e formatos é muito útil neste tipo de equipamento.
- **Monitoramento de performance:** os OXCs usualmente permitem que um equipamento externo seja conectado a uma porta de testes específica, onde os sinais que atravessam o OXC podem ser monitorados de maneira não intrusiva através da amostragem ou desvio de uma parte destes sinais.
- **Conversão de comprimento de onda:** além de comutar sinais de uma porta a outra, um OXC pode incorporar a capacidade de conversão de comprimento de onda.

Ainda segundo Ramaswami et al. (2009) existem basicamente três diferentes classificações de equipamentos OXC: os opacos, os transparentes e os translúcidos.

OXCs opacos são assim chamados por impedirem a passagem direta da luz, ou seja, a comutação que esse tipo de equipamento oferece é realizada no domínio elétrico. Para isso todos os sinais que entram no equipamento são convertidos em sinais elétricos e enviados a um *switch* ou processador eletrônico que fará o devido encaminhamento, para que então esses sinais sejam novamente convertidos em sinais ópticos através da utilização de *transceivers* e lasers. Este tipo de equipamento é amplamente empregado nas redes ópticas atuais e são muitas vezes conhecidos como OEO ou Óptico-Elétrico-Óptico em tradução livre.

Equipamentos OXC opacos possuem o inconveniente de que a circuitaria eletrônica utilizada para o processamento dos dados acaba por limitar a banda do sinal, ou seja, sua vazão ou *throughput*. Existem diversas razões para esta limitação sendo as principais delas as conversões de meio necessárias e o poder de processamento do próprio equipamento, ou seja, este tipo de equipamento apresenta maior latência. Apesar disso, a grande vantagem deste tipo de equipamento reside no custo-benefício, já que ele possibilita a regeneração do sinal óptico a cada nó da rede, visto que o sinal precisa ser recriado, e o controle e obtenção de métricas relativas à comunicação transportada por ele, o que tem grande valor para a gerência da rede, além de normalmente ter um custo atrativo quando comparado aos outros modelos.

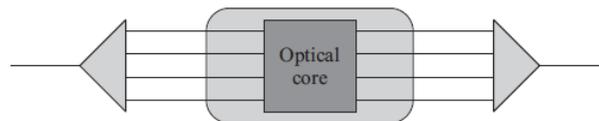
OXCs transparentes por sua vez, são assim chamados por não interromperem o sinal

de luz que os transpassa. Esse tipo de equipamento tem a capacidade de realizar a separação dos comprimentos de onda de luz e seu devido encaminhamento ou roteamento para a interface desejada.

Em linhas gerais, o sinal que chega ao equipamento (composta por diferentes  $\lambda$ s) é demultiplexada de acordo com a sua cor ou  $\lambda$ , direcionada para a saída desejada e unida aos demais  $\lambda$ s da respectiva saída através de um multiplexador, para então serem enviados através de uma fibra óptica.

Percebe-se que este tipo de equipamento faz a divisão e roteamento de luz em grande sem a necessidade de processamento do sinal, alterando o menos possível os sinais que por ele transitam (normalmente o efeito mais significativo sobre o sinal está relacionado à potência e separação de  $\lambda$ s do mesmo). Isto implica basicamente em dois fatores, por um lado a não limitação de banda do sinal garante altíssimo desempenho, por outro a não demodulação/interpretação do sinal impede a obtenção de métricas de qualidade ou controle sobre a comunicação. Além disso, estes equipamentos costumam ter seu desempenho grandemente atrelado a dispositivos sensíveis, como filtros internos, o que acarreta em um custo final elevado. Normalmente esse tipo de tecnologia pode ser facilmente encontrada em alguns filtros e *splitters* especiais. A Figura 3 contém o diagrama básico de um OXC transparente, percebe-se que o sinal de entrada é apenas repassado à respectiva saída sem nenhuma outra intervenção.

**Figura 3** – Exemplo básico de um equipamento OXC transparente.



Fonte: (RAMASWAMI et al., 2009)

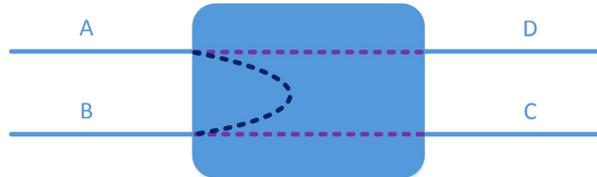
Por fim, um OXC translúcido traduz-se em um equipamento que representa um compromisso entre os dois tipos anteriores. Ou seja, um equipamento de roteamento em redes ópticas que tem a capacidade de processamento de pacotes e de chaveamento de luz. Este tipo de equipamento é o foco do presente trabalho.

A proposta que será detalhadamente descrita no Capítulo 3 aborda a utilização de equipamento óptico similar a um OXC translúcido através da utilização de chaveadores ópticos ou *switches* ópticos.

Chaveadores ópticos são componentes capazes de desviar um feixe luminoso através da utilização de um prisma refletor. A Figura 4 mostra o diagrama interno simplificado de

um chaveador óptico. Percebe-se que seu funcionamento é análogo ao de um relé elétrico (ACCELINK, 2014).

**Figura 4** – Diagrama interno simplificado de um chaveador óptico 2x2. Em um estado este componente transmite bidirecionalmente a luz da interface A para D e B para C, quando acionado ele transmite bidirecionalmente a luz da interface A para B.



**Fonte: Adaptado de Accelink (2014)**

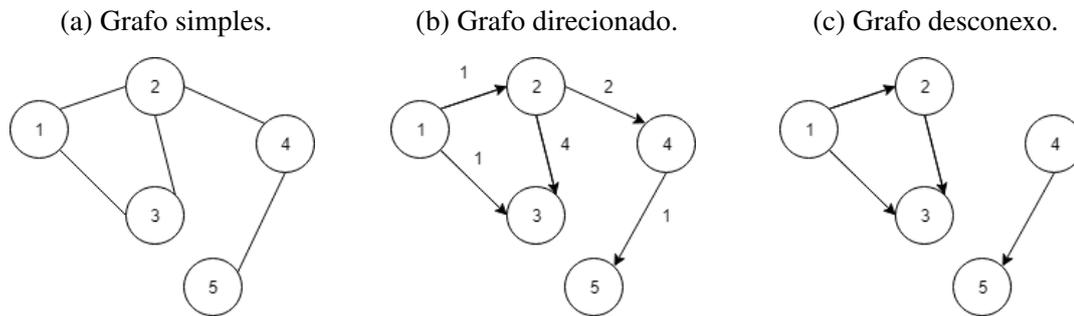
É importante ressaltar que um chaveador óptico em si é um componente ativo, mas que não realiza nenhum tipo de processamento. Quando o prisma refletor interno é acionado a luz passa a ser refletida para a saída sem sofrer outro tipo de influência, ou seja, ela é apenas desviada. Entretanto, a utilização de um chaveador óptico em um equipamento OEO pode conferir-lhe a capacidade de desviar sinais ópticos caso necessário, surgindo assim um equipamento que pode ser classificado como sendo um OXC translúcido.

## 2.4 GRAFOS

Grafos são, em essência, a representação gráfica de interligação entre elementos, e são representados por vértices conectados através de arestas (que representam a relação entre os vértices). Caso as arestas sejam orientadas (possuam sentido) o grafo é denominado direcionado, além disso, cada aresta pode conter um peso normalmente indicado no próprio grafo (FEOFILOFF PAULO; KOHAYAKAWA, 2011). Os tipos de grafos mais comuns são:

- Grafo simples: grafo não direcionado, sem arestas paralelas e sem laços;
- Grafo direcionado: similar ao grafo simples, porém com arestas direcionadas;
- Grafo conexo: um grafo pode ser dito conexo se sempre for possível estabelecer um caminho de qualquer vértice para qualquer outro vértice.

A Figura 5 representa os tipos básicos de grafo descritos. Pode-se perceber que o grafo representado na Figura 5a possui 5 vértices interligados através de arestas não direcionadas, logo este grafo pode ser classificado com um grafo simples e conexo visto que todos os nós são alcançáveis à partir de qualquer um deles. O grafo da Figura 5b por sua vez possui arestas

**Figura 5** – Tipos básicos de grafos

**Fonte: Autoria Própria.**

direcionadas, podendo ser classificado como um grafo direcionado e conexo. Além disso é possível ver um número em cada uma das arestas representando o peso das mesmas. Por fim, no grafo da Figura 5c pode-se verificar que nem todos os vértices são alcançáveis à partir de qualquer outro vértice, logo este é um grafo desconexo.

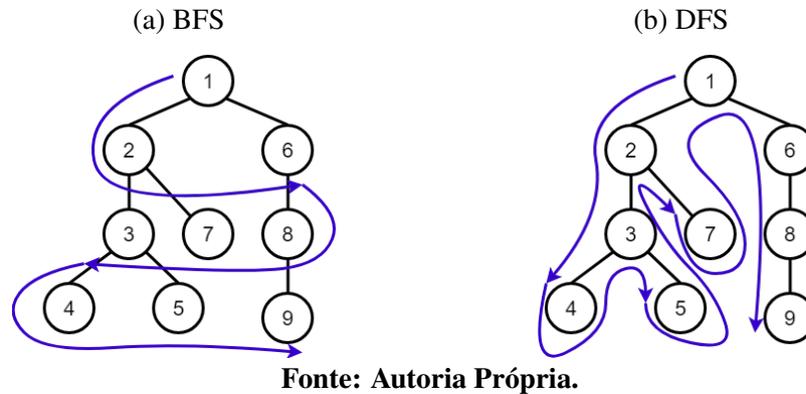
Existem outras convenções para representações de grafos, algumas delas são especialmente úteis para computação, como por exemplo as representações por adjacência visto que, nesta abordagem, a relação entre os vértices pode ser descrita em formato de lista. Dois vértices podem ser considerados adjacentes quando existe uma aresta entre eles. No grafo da Figura 5a por exemplo pode-se considerar que os vértices 1 e 2 são adjacentes enquanto os vértices 1 e 5 não são.

Além disso, vale a pena ressaltar o conceito de valência ou grau de um vértice, que nada mais é que o número de arestas incidentes a ele. Utilizando mais uma vez o grafo representado na Figura 5a pode-se dizer que os vértices 1, 3 e 4 têm valência 2; o vértice 2 tem valência 3 e o vértice 5 tem valência 1.

Outro conceito importante para o presente trabalho é o de *Árvore de extensão* ou *Árvore de dispersão* (*spanning tree* - normalmente o termo em inglês é mais utilizado), que pode ser traduzido como sendo o subconjunto de arestas de um grafo formando uma árvore que contém todos os vértices do grafo inicial. Como desdobramento deste conceito, pode-se facilmente definir a *árvore de extensão mínima*, *árvore de geração mínima* ou ainda *minimal spanning tree* como sendo o subconjunto de arestas de menor peso total contendo todos os vértices do grafo inicial (supondo um grafo com arestas contendo pesos) (EPPSTEIN, 1996).

Os grafos, têm diversas aplicações e podem ser usados para representar uma grande variedade de problemas e situações, normalmente eles conseguem modelar de maneira satisfatória alguns dos problemas dos campos da matemática, informática, engenharia, química e outras áreas. De maneira geral, uma das aplicações mais comuns é a utilização de grafos

**Figura 6** – Comparação básica entre busca em profundidade e largura. Em 6a pode-se notar que os vértices visitados são prioritariamente do mesmo nível em detrimento aos níveis mais baixos. Em 6b pode-se notar que todos os vértices de um ramo são visitados antes que o próximo seja explorado.



para a descoberta de caminhos entre diferentes pontos, representados como vértices, do grafo em questão. Um caminho em um grafo pode ser definido como uma sequência de vértices de maneira que entre cada um dos vértices listados existe uma aresta para o vértice seguinte, sendo que o custo deste caminho é a soma dos custos das arestas utilizadas.

Existem vários algoritmos de busca em grafos. Considerando-se grafos finitos, sempre é possível percorrer de modo sistemático todos os vértices e arestas existentes. Desta forma é possível também encontrar o menor caminho disponível (menor custo) entre dois vértices. De maneira geral existem dois modos básicos para percorrer um grafo, “Busca em Largura” ou BFS; quando durante a procura de um vértice específico os vértices do grafo são visitados respeitando-se os níveis do mesmo; e “Busca em profundidade” ou DFS; quando durante a procura de um vértice específico todos os nós de um ramo são visitados antes dos vértices do mesmo nível. A Figura 6 ilustra a diferença básica entre os dois modos.

Dentre os vários algoritmos utilizados em grafos destacam-se neste documento alguns que têm grande aderência ao conteúdo aqui abordado.

#### 2.4.1 ALGORITMO DE DIJKSTRA

O algoritmo de Dijkstra foi criado por Edsger Dijkstra em 1956. Ele é aplicável a grafos com múltiplos caminhos. À partir da estrutura inicial do grafo e de um vértice raiz, ele é capaz de extrair uma estrutura de árvore com apenas um caminho para cada vértice destino, selecionando para tal, os caminhos menos custosos. Ou seja, com o menor custo até a raiz (DIJKSTRA, 1959).

#### 2.4.2 ALGORITMO DE PRIM

O algoritmo de Prim foi desenvolvido por Vojtech Jarník em 1930 e posteriormente otimizado por Robert C. Prim em 1957 e Edsger Dijkstra em 1959, razão pela qual é também chamado de algoritmo Prim–Dijkstra. Ele é utilizado para encontrar um conjunto de arestas que formam uma árvore contendo todos os vértices de um grafo cujo peso total (soma dos pesos individuais de todas as arestas) é mínimo, formando uma árvore geradora mínima (PRIM, 1957).

#### 2.4.3 ALGORITMO DE BUSCA DE CUSTO UNIFORME

A Busca de Custo Uniforme é na verdade um algoritmo de busca em grafos que estende o algoritmo de Busca em Largura, representado na Figura 6a, de modo a sempre encontrar a solução ótima para qualquer valor de passo (peso) através da expansão do nó com menor custo de caminho (RUSSELL; NORVIG, 2018). Em outras palavras o algoritmo de Busca de Custo Uniforme é um tipo de busca em grafos com garantia de otimalidade, visto que é um algoritmo exaustivo. Ou seja, avalia todas as opções até a obtenção do ótimo.

Este algoritmo apresenta um bom custo benefício ao comparar sua complexidade espacial (quantidade de memória utilizada) e temporal (tempo necessário para execução) com a garantia de otimalidade (obtenção do custo ótimo), visto que sua implementação é muito similar ao algoritmo utilizado na BFS.

#### 2.4.4 SPANNING TREE PROTOCOL

Um dos protocolos mais utilizados em Redes Locais e SGs é o STP ou *Spanning Tree Protocol* e o RSTP ou *Rapid Spanning Tree Protocol*. Ambos os protocolos foram baseados no algoritmo Prim, capaz de calcular a árvore geradora mínima de um grafo (ou *spanning tree*), conforme citado em 2.4.2. Eles na verdade fazem parte de uma família de protocolos recorrentemente utilizados em redes de comunicação com multipercursos (caminhos redundantes). Seu principal foco é impedir a criação de *loops* na rede decorrentes da topologia utilizada.

Para isso eles se utilizam de pacotes especiais de controle denominados BPDUs (Bridge Protocol Data Units) (IEEE COMPUTER SOCIETY, 2004), possibilitando que todos os equipamentos tenham o conhecimento completo da rede. De posse dessas informações, o caminho de menor custo entre o nó raiz e os demais pode ser calculado e os comutadores então desligam as portas que não fazem parte deste caminho, criando uma topologia com um caminho

**Tabela 1** – Comparação elencando os parâmetros básicos de rede entre uma rede de distribuição normal e uma rede *Smart Grid*

	<b>Grade Atual</b>	<b>Smart Grid</b>
<b>Fluxo de informação</b>	Unidirecional	Bidirecional
<b>Geração de eletricidade</b>	Geração centralizada	Geração Distribuída
<b>Topologia da grade</b>	Radial	Malha
<b>Sensores</b>	Poucos sensores	Muitos sensores
<b>Monitoramento</b>	Usualmente inexistente	Auto monitorada
<b>Recuperação de falha</b>	Restauração manual	Auto reconfiguração
<b>Teste</b>	Manual	Remoto
<b>Capacidade de controle</b>	Limitado	Penetrante
<b>Tipo de controle</b>	Passivo	Ativo
<b>Eficiência</b>	Baixa	Alta
<b>Geração de poluição</b>	Alta	Baixa

Fonte: Adaptado de (MA et al., 2013)

único na rede para os pacotes trafegarem e impedindo a formação de *loops*.

Apesar de sua configuração muitas vezes não poder ser realizada por um leigo, o STP e o RSTP são os protocolos mais utilizados em *Smart Grids* já que possibilitam a utilização de uma rede física com multi-percursos, o que significa a existência de rotas redundantes e, consequentemente, o aumento de confiabilidade/estabilidade da rede.

## 2.5 SMART GRIDS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

Assim como brevemente descrito no capítulo 1, as redes inteligentes de distribuição de energia ou *Smart Grids* oferecem uma ampla variedade de serviços até então minoritários ou até mesmo inexistentes nas redes de distribuição de energia convencionais. Em (MA et al., 2013) pode-se encontrar um breve relato de alguns dos benefícios oferecidos pelas redes inteligentes como o melhor gerenciamento de energia, monitoramento remoto da operação e assertividade na recuperação diante de falhas, diminuição de desperdício através do maior controle entre ajuste de produção e demanda, menor necessidade de equipes de campo, entre outros. A Tabela 1 traz uma breve comparação entre os principais pontos de diferença entre as redes de comunicações utilizadas nas redes de distribuição de energia atuais e nas *Smart Grids*. Através da comparação destes dados é possível notar a importância da utilização de um meio físico estável e com alta capacidade, sendo naturalmente justificável a utilização de fibras ópticas na construção da infraestrutura destas redes.

Como dito anteriormente, os requisitos de latência das redes *Smart Grid* são altamente importantes devido à multiplicidade de sensores e aplicações suportadas pela rede. O trabalho

**Tabela 2** – Tempos esperados de latência em uma rede *Smart Grid* para diversos serviços

<b>Latência permitida</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Tipo de Serviço</b>
<10ms	Proteção de alta velocidade (para 60Hz, 50Hz)	Proteção
10ms a 20ms	Proteção e controle de transformadores	Proteção
20ms a 100ms	Pooling de dispositivos de automação SCADA	SCADA (automação)
100ms a 250ms	Comunicação de equipes de campo, CCTV	Intranet da empresa de energia, SCADA
250ms a 1s	Medições prioritárias	Medição de energia
>1s	Medições periódicas	Medição de energia

**Fonte:** Adaptado de (DESHPANDE et al., 2011)

apresentado em (DESHPANDE et al., 2011) contém uma tabela informativa, representada na Tabela 2, sobre os requisitos de atraso e prioridade que devem ser praticados/atingidos nestas redes destacando-se os serviços de proteção que precisam alcançar os valores de latência mais baixos sob quaisquer circunstâncias. Segundo Deshpande et al. (2011) o atraso máximo para estes serviços deve ser de 10ms sob qualquer circunstância de rede, sendo este o principal fator motivador para a análise de possíveis formas de redução de latência em redes futuras onde o tráfego de dados será sensivelmente maior do que o das redes atuais.

A partir destas informações, espera-se que as redes SG sejam construídas sobre uma infraestrutura de fibras ópticas utilizando topologia em malha, tendo em vista maior redundância e estabilidade para a comunicação. É importante salientar que, devido a multiplicidade de serviços e sensores citada, as redes SG devem crescer exponencialmente à medida que mais sensores e serviços sejam agregados à mesma. Dessa forma, as futuras redes SG têm uma grande perspectiva em termos de número de nós. Um bom exemplo disso é a escala dos projetos de SG atuais em países como o Japão, onde a TEPCO, maior empresa de distribuição de energia elétrica do país, possui uma rede com cerca de 27 milhões de dispositivos de medição *smart* sendo que cada um destes dispositivos precisa se comunicar com algum tipo de *gateway* ou concentrador na rede de comunicação/automação para a respectiva transmissão dos dados gerados.

É importante salientar que as redes SG naturalmente possuem requisitos estritos com relação aos equipamentos de comunicação. Considerando-se o objetivo primário destas redes, que é o de estabelecer um meio de comunicação estável, efetivo e resiliente para os equipamentos utilizados, dentre outros objetivos, na distribuição de energia elétrica, espera-se que os equipamentos de comunicação escolhidos sejam capazes de operar nos mesmos

ambientes onde a rede de distribuição de energia elétrica está instalada. Ou seja, os equipamentos de comunicação devem operar fisicamente instalados no alto de postes, expostos a grandes variações de temperatura e sem ventilação forçada. Desta forma, é natural que estes equipamentos possuam menor capacidade de processamento que os equipamentos normalmente utilizados em redes ópticas, sendo desta forma natural que cada um deles insira valores consideráveis de latência na comunicação.

## 2.6 COMPUTAÇÃO EVOLUCIONÁRIA E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

A IA (Inteligência Artificial) ou AI (*Artificial Intelligence*), pode ser considerada como um campo de pesquisa multidisciplinar ligado ao desenvolvimento e investigação de sistemas inteligentes (BROWNLEE, 2011). Segundo Russell e Norvig (2018) a IA pode ser dividida em 4 categorias: sistemas que pensam como humanos, sistemas que agem como humanos, sistemas que pensam com razão e sistemas que agem com razão.

Um dos campos comumente relacionados à IA é a Computação Evolucionária ou CE, que foi inicialmente concebida por Lawrence J. Fogel em meados de 1960 (FOGEL et al., 1966) e pode ser representada como a junção de diferentes abordagens de simulação de aspectos da evolução (BACK et al., 1999). Todas estas abordagens envolvem aspectos em comum como: reprodução, aleatoriedade ou mutação, competição e seleção. Até o surgimento da CE a IA estava, em sua maioria, focada em heurísticas e simulações de redes neurais primitivas. Abordagens estas que mostravam-se, segundo Fogel, limitadas já que produziam modelos muito mais próximos de um comportamento humano do que de um processo envolvido na criação de indivíduos ou intelectos (evolução) (BACK et al., 1999).

De maneira geral a evolução é um processo de otimização, o que definitivamente não implica em perfeição, aliado à grande robustez de adaptação visto que o mundo real nunca é estático (BACK et al., 1999; FOGEL, 1995).

Visto que os algoritmos evolucionários foram inspirados em modelos de evolução orgânica, todos eles compartilham algumas características básicas (BACK et al., 1999):

- Algoritmos Evolucionários utilizam o processo de aprendizado coletivo através de uma população de indivíduos. Geralmente, cada indivíduo representa (ou codifica) um ponto de pesquisa no espaço de possíveis soluções para um determinado problema;
- Descendentes de indivíduos são gerados por processos aleatórios com objetivo de modelar a mutação e recombinação. Mutação corresponde a uma auto-replicação incorreta

(normalmente, pequenas modificações são mais prováveis que grandes), enquanto a recombinação troca informações entre dois ou mais indivíduos existentes;

- Através de uma avaliação dos indivíduos uma medida de qualidade ou adequação pode ser atribuída a cada indivíduo. Isso permite uma comparação da aptidão a ser utilizada no favorecimento de melhores indivíduos para se reproduzirem com mais frequência do que os relativamente piores.

### 2.6.1 ALGORITMOS GENÉTICOS

Os fundamentos dos Algoritmos Genéticos ou AG nasceram em meados de 1960 e estavam ligados a princípios de sistemas adaptativos, isto é, sistemas capazes de se auto modificar em resposta à interação com o ambiente ao qual estão submetidos. Neste sentido, modelos de evolução biológica pareciam representar bem estas características, através de noções como a sobrevivência dos indivíduos mais adaptados e sua contínua produção de novas descendências (BACK et al., 1999).

A partir do desenvolvimento destas ideias deu-se início a uma das classes dos algoritmos evolucionários mais difundidas e utilizadas, os Algoritmos Genéticos (primeiramente propostos por John Holland em 1975 (BACK et al., 1999)). Estes algoritmos são caracterizados por serem uma técnica de otimização global através de estratégias adaptativas e são assim chamados por serem inspirados na genética e evolução de populações. Por isso, é comum que eles se utilizem de termos da biologia como *cromossomos*, *genes*, *recombinação*, *mutação*, etc (BROWNLEE, 2011) para representar estruturas e variáveis.

A relação mais difundida entre esses termos e sua devida correspondência em computação é mostrada na Tabela 3.

**Tabela 3** – Correlação entre vocábulos da Biologia e os utilizados em AGs

<b>Biologia</b>	<b>Computação</b>
Cromossomo	Indivíduo
Gene	Caractere
Alelo	Valor do caractere
Lócus	Posição do caractere
Genótipo	Vetor de caracteres representando o indivíduo
Fenótipo	Interpretação do vetor de caracteres

**Fonte: Autoria Própria.**

De maneira básica e generalista pode-se dizer que uma população inicial de indivíduos devidamente correlacionados com o problema em questão é gerada, normalmente de maneira

aleatória, e cada indivíduo é avaliado separadamente estabelecendo um *ranking* (normalmente chamado de *fitness*) dos mais adaptados ao problema sob análise. Então, alguns indivíduos da população são selecionados para reprodução, sendo que os indivíduos mais adaptados usualmente recebem mais chances de participar deste processo. Além disso, também existe a mutação que visa alterar o conteúdo genético de um indivíduo aleatoriamente, diferenciando-o de seus pais. Para o surgimento da nova geração, os indivíduos gerados (filhos) devem ser unidos aos seus pais e deve existir um método de seleção de indivíduos a fim de evitar o aumento descontrolado da população (BACK et al., 1999). Existem diversas técnicas diferentes para cada um dos passos acima citados, cada uma delas deve influenciar o algoritmo de maneira diferente (tempo de execução, utilização de memória, processamento utilizado, etc). Apesar de não existirem garantias, em qualquer um dos casos espera-se encontrar o valor ótimo para a função avaliada. O Algoritmo 1 é uma representação em alto nível da estratégia básica de um AG.

---

**Algoritmo 1** - Exemplo de alto nível para AG

---

```

1: Population ← InitializePopulation
2: EvaluatePopulation(Population);
3: Sbest ← GetBestSolution(Population)
4: while StopCondition() do
5:   Parents ← SelectParents(Population,PopulationSize)
6:   Children ← 0
7:   for each Parent1, Parent2 ∈ Parents do
8:     Child1, Child2 ← Crossover(Parent1, Parent2)
9:     Children ← Mutate(Child1)
10:    Children ← Mutate(Child2)
11:  end for
12:  EvaluatePopulation(Children);
13:  Sbest ← GetBestSolution(Children)
14:  Population ← Replace(Population, Children)
15: end while
16: return Sbest

```

---

**Fonte: Adaptado de Brownlee (2011)**

A linha 1 do Algoritmo 1 representa a criação aleatória de uma população inicial. Esta população é então avaliada (linha 2) e seus indivíduos são classificados de acordo com seu grau de adaptabilidade ao problema proposto, sendo que o melhor indivíduo desta população, ou seja, o mais adaptado ao problema é salvo como sendo a melhor solução até o momento (linha 3).

Em seguida dá-se início a um processo de criação de novas gerações através do cruzamento de indivíduos da geração atual, respeitando critérios de seleção para cruzamento

relacionados com aleatoriedade e probabilidade, assim como em um processo de evolução orgânica. A população antiga é substituída pela nova e o novo melhor indivíduo é salvo como sendo a nova melhor solução. O processo se repete até que um critério de parada seja alcançado (linhas 4 a 15).

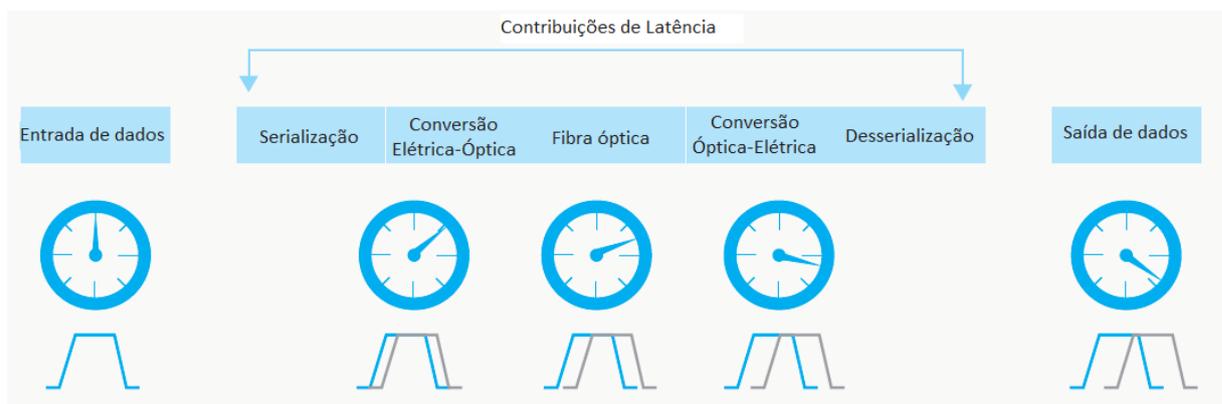
De maneira geral, Algoritmos Genéticos são uma classe de algoritmos pertencente à Computação Evolucionária que apresentam grande aplicabilidade na busca de maximização ou minimização em problemas com grandes universos de busca. Logo, tendo em vista os possíveis tamanhos das futuras redes SG assim como a grande variedade de possíveis interconexões entre os nós participantes das mesmas, decidiu-se pela utilização dos AGs na proposta deste documento. Dessa forma, o AG é responsável pela busca de qual estrutura física de rede, manipulada dinamicamente através de chaveadores ópticos, será a mais propícia para a redução de latência da rede como um todo. Assim espera-se que a proposta apresentada seja suficientemente genérica para que sua aplicação seja possível nos mais diversos cenários a serem encontrados, tanto nas redes atuais quanto futuras.

### 3 BSN - BYPASS SELETIVO DE NÓS

Os atrasos existentes em equipamentos elétricos utilizados em redes ópticas têm diversas origens, como o processamento dos dados (intrinsecamente relacionado ao poder de processamento do equipamento) e as conversões de meio necessárias, sendo que para cada equipamento óptico podem-se considerar pelo menos duas dessas conversões (óptica-elétrica-óptica).

Logo, todas as vezes que um pacote trafega em uma rede óptica acaba sofrendo atrasos em cada um dos nós participantes do circuito. Estes atrasos devem ser somados a fim de determinar a latência total de um enlace. A Figura 7 mostra o acúmulo da latência através de um enlace óptico entre dois pontos. Os principais pontos de inserção de latência são resultantes dos processos de serialização, conversão elétrica-óptica, transmissão de dados, conversão óptica-elétrica e disponibilização dos dados no destino (desserialização e processamento).

**Figura 7** – Latência entre dois pontos utilizando enlace óptico.



Fonte: Adaptado de: Coffey (2017)

Assim, a proposta apresentada neste documento, denominada de BSN “*Bypass Seletivo de Nós*”, preenche uma lacuna existente entre os equipamentos puramente ópticos e os ópticos/elétricos. O BSN foi especificamente desenvolvido para redução de latência em redes ópticas através da utilização de chaveadores ópticos em pontos estratégicos da rede. Essa otimização é realizada através da reconfiguração da camada física da rede e conseqüentemente

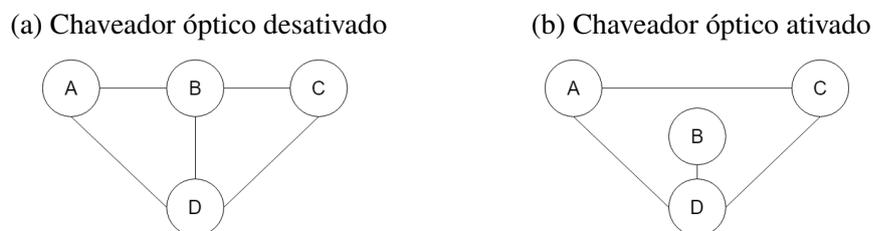
da topologia da mesma. Dessa forma, após a utilização do BSN, equipamentos em posições específicas da rede, assim como os sinais que trafegam por ela, podem ser desviados sem a necessidade de nenhuma conversão de meio ou mesmo processamento, resultando na mínima inserção de latência possível.

O BSN opera de maneira completamente independente do protocolo de roteamento utilizado na rede em questão visto que altera somente o grafo da mesma, podendo ser usado inclusive em conjunto com protocolos de camada 2, ou seja, sem roteamento. Ele pode ser utilizado em qualquer rede óptica que contenha multi-caminhos ou redundâncias de maneira a possibilitar a criação de novas topologias a partir da reorganização das ligações físicas. Para tanto, é necessário que a rede em questão possa ser representada por um grafo simples, ou seja, um grafo que não possui arestas paralelas ou pontas coincidentes (laços) conforme anteriormente descrito na Seção 2.4.

Os pontos da rede de acionamento do chaveador óptico podem ser escolhidos em ramos de um grafo com muitos vértices ou podem ser planejados para o estabelecimento de rotas específicas para comunicação com pontos críticos do sistema, estabelecendo por exemplo um SLA (*Service Level Agreement*) em camada física.

Através da utilização do BSN é possível reduzir o grafo da rede possibilitando uma nova configuração de conexões inexistente na rede original e conseqüentemente uma nova variedade de rotas possíveis. Cada vez que o BSN ativa um *bypass*, as duas arestas envolvidas são unificadas evitando o vértice das mesmas, criando assim um novo grafo com uma distância entre os dois vértices finais de um vértice a menos, como representado na Figura 8. Dessa forma, em caso de falha ou mudança de SLA, a topologia física pode ser alterada automaticamente.

**Figura 8** – Efeito da utilização do chaveador óptico em uma rede de comunicação. Em 8a pode-se ver a rede original contendo dois saltos entre os vértices A e C. Em 8b após o acionamento do *bypass* no dispositivo no vértice B pode-se ver a existência de apenas um salto entre os vértices A e C



**Fonte: Autoria Própria.**

As próximas seções descrevem em detalhes o funcionamento da proposta. Para isso, a Seção 3.1 apresenta um estudo de caso. Em seguida, na Seção 3.2 é apresentado o algoritmo proposto e na seqüência, a Seção 3.3 apresenta a ferramenta criada para possibilitar a avaliação

e posterior análise dos resultados da proposta.

### 3.1 ESTUDO DE CASO

Para demonstrar o funcionamento do BSN foi gerada a rede exemplo mostrada na Figura 9a. Como pode-se notar essa rede é representada por um grafo simples com valência igual a 3, e pode ser classificada com sendo uma rede em malha. O estudo de caso pode ser dividido em 2 fases, a primeira consiste na utilização do protocolo STP para determinar o grafo mínimo da rede. Na segunda fase é utilizado o algoritmo BSN, sendo possível desse modo comparar os resultados obtidos.

Dessa forma, o grafo da Figura 9a foi submetido ao protocolo STP para cálculo dos caminhos ótimos para todos os vértices à partir do vértice origem (arbitrariamente escolhido como sendo o 1). A Figura 9b mostra o resultado desta operação, ou seja, ela representa, a *minimal spanning tree* para o grafo da Figura 9a, conforme descrito na Seção 2.4. Esta figura representa os caminhos ótimos para, saindo do vértice raiz, alcançar todos os demais vértices. Deste modo, o grafo da Figura 9b representa o melhor caso possível em termos de profundidade de rede sendo portanto o resultado da primeira fase do estudo.

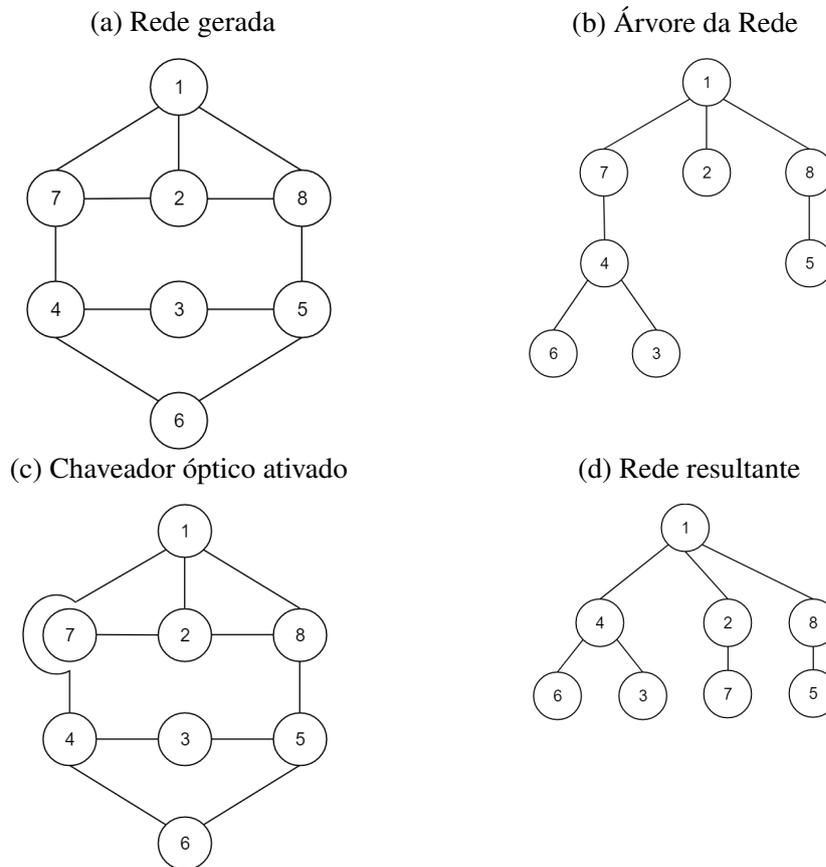
Na seqüência, a rede da Figura 9a foi submetida à execução do BSN. Como resultado decidiu-se pelo acionamento do chaveador óptico no vértice 7, interligando o vértice 1 diretamente ao 4 gerando um novo grafo da rede conforme representado na Figura 9c. Este grafo, quando submetido ao cálculo dos caminhos ótimos também utilizando o protocolo STP, assim como realizado com a rede original, resulta no grafo da Figura 9d que podemos chamar de resultado da Fase 2. Através da comparação entre os resultados das Fases 1 e 2 pode-se notar a diminuição da profundidade em comparação com aquele mostrado na Figura 9b.

Este exemplo ilustra, em uma rede de apenas 8 nós, o funcionamento da metodologia proposta (BSN). É possível notar que a profundidade da rede é reduzida, impactando na redução de latência para a comunicação entre os nós envolvidos. Para o exemplo em questão pode-se reduzir a profundidade máxima da rede de 3 saltos para 2 (33,33%), o que impacta diretamente na latência devido a ausência de conversão de meio assim como processamento no vértice desviado, conforme apresentado na Figura 7.

### 3.2 ALGORITMO PROPOSTO

O método de redução do grafo de rede utilizado pelo BSN é descrito em alto nível através do fluxograma da Figura 10 e do pseudocódigo representado no Algoritmo 2. O

**Figura 9** – Exemplo de funcionamento do BSN. Percebe-se que o BSN consegue reduzir a profundidade de uma rede gerando uma nova possibilidade de conexões através da manipulação da camada física da mesma.



**Fonte: Autoria Própria.**

BSN utiliza vários conceitos de otimização simultâneos. A ideia básica é a utilização de um algoritmo genético para a criação de diferentes combinações de estado dos chaveadores ópticos na rede (de acordo com as premissas de projeto a serem adotadas). Dessa forma, cada uma das combinações geradas pelo algoritmo genético acaba por gerar uma nova topologia com diferentes interconexões, que são por sua vez otimizadas buscando obter a rede menos profunda possível. Esta busca compreende, em essência, a escolha de quais arestas do grafo serão utilizadas para estabelecer a comunicação entre os nós e quais não serão utilizadas.

De maneira geral o Algoritmo 2 é iniciado com valores indicativos do tamanho das populações e do número de gerações a serem utilizadas. Em seguida uma população inicial é criada indivíduo a indivíduo, sendo que cada um deles representará uma configuração de rede completa. Cada um destes indivíduos é avaliado através do cálculo do seu valor de *fitness*, e então inserido em uma lista que representa a população criada.

Na sequência os indivíduos da geração atual mais bem adaptados ao problema são

---

**Algoritmo 2** - Algoritmo básico do BSN
 

---

```

1: popsiz ← tamanho da população
2: gennumb ← número de gerações
3:
4: PopList[] = new List[popsiz]           ▷ Variável para alocação da geração atual
5: i ← 0
6: while i < popsiz do
7:   Indivíduo = CriaIndivíduo()         ▷ Cria a uma configuração de rede (indivíduos da
   população)
8:   CalculaFit(Indivíduo)               ▷ Realiza busca local na instância de rede (calcula fitness do
   indivíduo)
9:   PopList.Add(Indivíduo)               ▷ Adiciona a instância de rede à lista
10:  PopList.ClassificaIndivíduos()      ▷ Organiza a população atual de acordo com o Fitness
   individual
11: end while                             ▷ População inicial criada
12:
13: j ← 1
14: while j < gennumb do                 ▷ Roda algoritmo genético
15:   ParentsList[] = new List[]           ▷ Variável para alocação de indivíduos “pais”
16:   NewList[] = new List[popsiz]        ▷ Variável para alocação da próxima geração
17:   ParentsList = SeleccionaIndivíduos(PopList) ▷ Selecciona os indivíduos da geração atual
   que serão utilizados para criação da geração seguinte
18:   NewList = CrossOver(ParentsList)     ▷ Realiza crossover nos indivíduos selecionados
19:   Mutation(NewList)                   ▷ Aplica algoritmo de mutação de genes na nova população
20:   PopList = MesclaGen(NewList, PopList) ▷ Realiza elitismo de indivíduos
21:   PopList.ClassificaIndivíduos()      ▷ Organiza a população atual de acordo com o Fitness
   de cada indivíduo
22: end while
23:
24: return PopList.Indivíduo(0)          ▷ Retorna a melhor instância de rede (indivíduo)

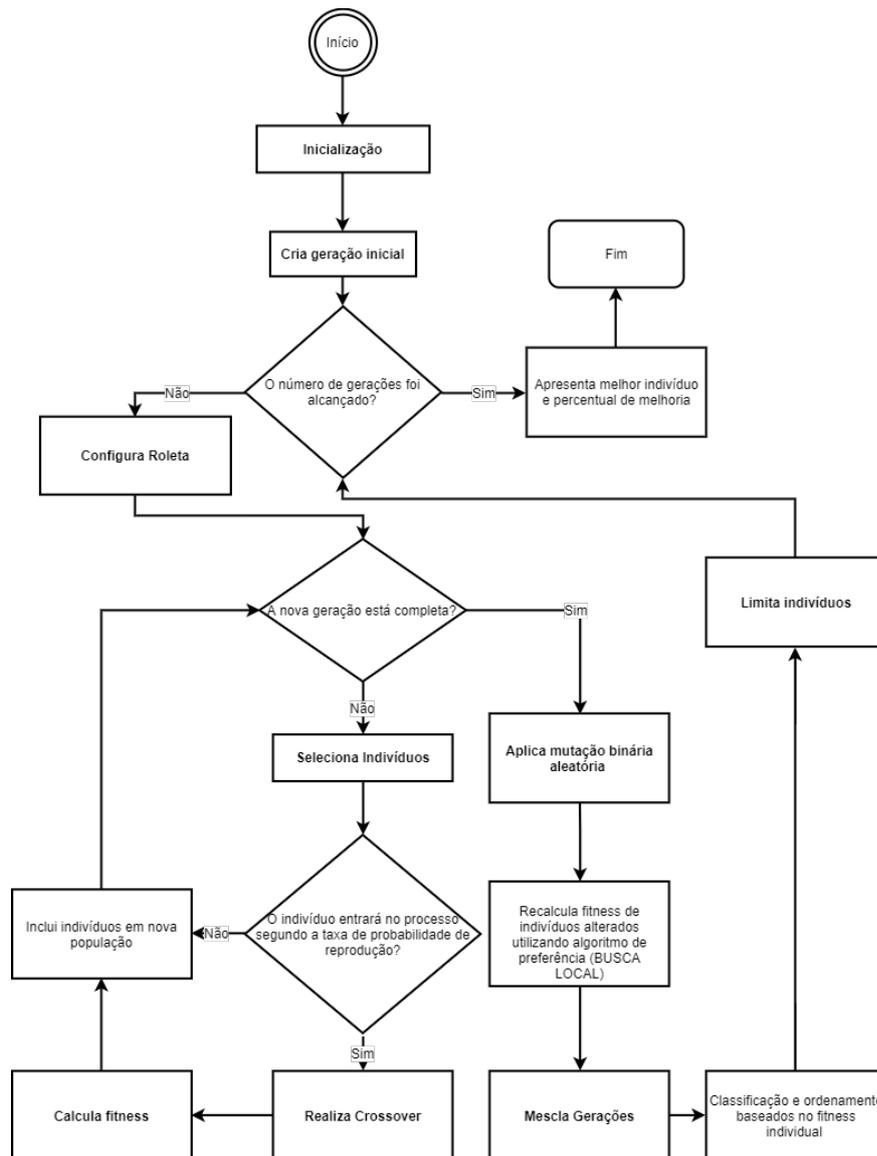
```

---

selecionados para o processo de *Crossover*. Neste processo serão gerados indivíduos filhos à partir do código genético dos pais, acelerando a convergência do algoritmo. Os indivíduos da nova geração passam pelo processo de mutação criando pequenas diferenças aleatórias em seus códigos genéticos, evitando que o algoritmo fique preso em um máximo ou mínimo local. A geração atual é então mesclada com a antiga e ordenada de acordo com o valor de *fitness* de cada indivíduo assim como anteriormente. Este processo se repete até a convergência do algoritmo.

Dessa forma, para o passo representado na linha 8 do Algoritmo 2 (busca local - termo recorrentemente utilizado para descrever algoritmos de busca que se iniciam em um estado e movem-se para a vizinhança deste estado buscando o valor ótimo), que representa a seleção de quais arestas do grafo em questão deverão ser utilizadas, pode ser considerado qualquer algoritmo conhecido. Daí vem o fato de o BSN ter a capacidade de ser utilizado com qualquer protocolo padrão de otimização de rede como o STP por exemplo. O presente documento

**Figura 10** – Fluxograma do funcionamento do BSN



**Fonte: Aatoria Própria.**

utiliza para este passo uma busca de custo uniforme, garantindo assim a obtenção do valor ótimo de *fitness*, que neste código está relacionado ao custo total da rede. Ou seja, o algoritmo de custo uniforme irá resultar na melhor rede possível para o grafo em questão já que este tipo de busca é exaustiva e explora todas as combinações possíveis para então selecionar a melhor delas (RUSSELL; NORVIG, 2018).

A seguir é apresentada uma descrição sucinta dos passos usados no método de redução de grafos do BSN representados na Figura 10 assim como no Algoritmo 2, sendo que aqueles mais importantes são detalhados nas próximas seções.

**Inicialização** representa o passo de configuração inicial das variáveis de tamanho da

população (quantidade de indivíduos em cada geração do algoritmo), número de nós da rede, número máximo de gerações a serem geradas pelo algoritmo, nó do grafo a ser considerado como raiz, probabilidade de reprodução e probabilidade de mutação.

**Cria geração Inicial** representa o passo onde a primeira coleção de indivíduos é criada. Cada um dos indivíduos é criado, de acordo com o que está descrito na Seção 3.2.2, de maneira aleatória respeitando o tamanho da população e o número de nós da rede indicados no início da execução. A coleção de indivíduos criada neste passo é considerada como a população inicial do algoritmo.

**Configura roleta** representa o passo onde os dados para a seleção dos melhores indivíduos de cada população são adquiridos e organizados. Este passo está descrito com maior nível de detalhes na Seção 3.2.5, mas de maneira geral pode-se dizer que todos os indivíduos são avaliados individualmente criando um ranking dos mais adaptados ao problema em questão. Este ranking é utilizado na criação de uma roleta de probabilidades de escolha, também chamada de *Roulette Wheel*, que servirá como parâmetro para o sorteio e seleção de indivíduos. Dessa forma, os indivíduos da população corrente a serem selecionados para participar na formação da próxima geração são sorteados (no próximo passo), seguindo uma distribuição de probabilidades baseada no ranking de adaptação dos indivíduos da própria geração.

**Seleciona Indivíduos** representa o passo onde os indivíduos que entrarão no processo de reprodução são selecionados de acordo com o método *Roulette Wheel* (GOLDBERG, 1989), ou seja, segundo a roleta de probabilidades calculada no passo anterior.

**Realiza Crossover** representa o cruzamento de dois indivíduos anteriormente escolhidos para reprodução e conseqüente geração de um novo indivíduo para a nova população. Este passo está descrito em maiores detalhes na Seção 3.2.4, a ideia básica é a perpetuação dos genes mais adaptados ao problema, o que em última instância significa caminhar na direção do ótimo global para o problema considerado.

**Calcula Fitness** é a operação básica de avaliação de adaptabilidade dos indivíduos. Essa operação é descrita em detalhes na Seção 3.2.3. Destaca-se aqui mais uma vez a importância da independência do BSN com relação ao método de ordenamento dos indivíduos ou redes avaliados, denominado genericamente de “Busca Local”. O BSN utiliza o conceito de custo da rede, conforme descrito na Seção 3.2.1, para ordenar os indivíduos de cada uma das gerações, sendo que cada um deles por sua vez tem seu custo calculado utilizando o algoritmo de “Custo Uniforme” garantindo assim o melhor resultado possível visto que este algoritmo é exaustivo e garante a obtenção do mínimo ou máximo global.

**Aplica mutação binária aleatória** representa o passo da alteração aleatória de um único cromossomo, ou seja, a alteração aleatória de um indivíduo. Esse passo tem um importante papel na execução do AG para prevenir que o algoritmo fique preso em um mínimo local durante a busca do mínimo global. Ele consiste no sorteio de um cromossomo dentro de toda a população seguido pela operação de complemento do alelo de um gene aleatório deste cromossomo, alterando assim o conteúdo genético do indivíduo em questão.

**Mescla Gerações** é o passo onde é realizado o “elitismo”. Em resumo, é neste passo que os indivíduos mais antigos com alto valor de *fitness* (muito bem adaptados) são perpetuados para a próxima geração. Caso contrário, estes indivíduos podem ser mortos e seu código genético acabaria por se perder, dificultando a convergência do algoritmo para o ótimo global. Para realizar esta tarefa o algoritmo mescla a geração nova e a antiga e realiza a classificação de todos os indivíduos através de seu valor de *fitness*. Dessa forma os indivíduos mais bem adaptados da geração anterior podem concorrer a uma posição na nova geração caso seus *fitness* individuais lhes sejam bons o suficiente.

**Limita indivíduos** é o passo análogo à morte dos indivíduos antigos ou não selecionados de acordo com o ordenamento realizado anteriormente. Esse passo é de suma importância para salvar recursos computacionais, visto que caso ele não exista o número de indivíduos da população corrente irá crescer muito rapidamente a cada iteração do programa inviabilizando a execução do mesmo. Para isso, a geração corrente é limitada em termos de número de indivíduos de acordo com o parâmetro de tamanho máximo de população, sendo que desta forma os indivíduos com menor valor de *fitness* são descartados.

### 3.2.1 CUSTO DA REDE

O custo da rede é definido como a soma de todos os custos individuais (número de saltos) para comunicação em cada um dos enlaces da rede. Logo, utilizando a rede de exemplo representada na Figura 9b tem-se o mostrado na Tabela 3a como sendo os custos individuais para comunicação entre o nó origem (nó 1) e os demais assim como o custo total da rede. Em contrapartida, ao utilizar a rede representada na Figura 9d, que foi otimizada através da utilização do BSN, tem-se como resultado para os custos individuais e custo total o representado na Tabela 3b.

À partir da comparação dos dados apresentados na Tabela 3 nota-se que o custo total da rede foi reduzido em aproximadamente 15,38%. Além disso, ao comparar o custo para cada um dos nós de maneira individual pode-se notar que para os destinos 3 e 6 foi alcançado 33,33% de melhoria e para o destino 4 foi alcançado 50% de melhoria.

**Tabela 3** – Exemplificação do cálculo e comparação entre o custo total para duas redes exemplo

(a) Calculo de custo - Rede Figura 9b

(b) Calculo de custo - Rede Figura 9d

Nó destino	Caminho	Custo	Nó destino	Caminho	Custo
<b>2:</b>	1 2	1	<b>2:</b>	1 2	1
<b>3:</b>	1 7 4 3	3	<b>3:</b>	1 4 3	2
<b>4:</b>	1 7 4	2	<b>4:</b>	1 4	1
<b>5:</b>	1 8 5	2	<b>5:</b>	1 8 5	2
<b>6:</b>	1 7 4 6	3	<b>6:</b>	1 4 6	2
<b>7:</b>	1 7	1	<b>7:</b>	1 2 7	2
<b>8:</b>	1 8	1	<b>8:</b>	1 8	1
<b>Custo Total 13</b>			<b>Custo Total 11</b>		

**Fonte: Autoria Própria.**

Assim, pode-se concluir que o BSN não apenas minimiza o custo ou latência da rede como um todo, mas também apresenta em especial, um resultado muito interessante ao avaliar-se o custo de uma rota em específico (como no caso do resultado obtido para o destinos 4 por exemplo). Desta forma a metodologia proposta pode ser extremamente útil no estabelecimento de políticas de QoS para definição ou criação de topologias físicas, sendo esta uma aplicação jamais explorada anteriormente de acordo com as pesquisas realizadas pelos autores.

### 3.2.2 REPRESENTAÇÃO

Conforme descrito anteriormente, tanto na Computação Evolucionária quanto nos AGs, como é o caso do BSN, é comum encontrar termos da biologia para representar estruturas e variáveis. No presente documento a relação entre estes termos é dada conforme o mostrado na Tabela 3.

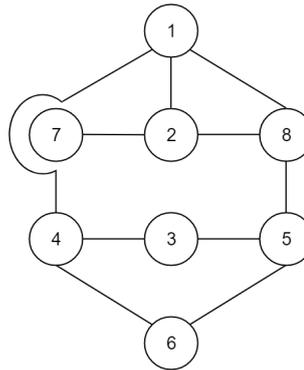
Seguindo estas definições, o BSN cria um conjunto de Cromossomos, denominado de população. Esta população é constituída pelos diversos indivíduos cujos Genótipos estão baseados na rede em questão. Cada um dos Cromossomos é representado como sendo um vetor *booleano* com o número de Genes igual ao número de nós da rede a ser otimizada e onde cada um dos Lócus representa unicamente um nó. Os Alelos por sua vez representam o estado do chaveador ótico no respectivo nó. Em resumo, seguindo esta convenção, pode-se representar a rede mostrada na Figura 9c através do Cromossomo (ou indivíduo) da Tabela 4.

Como pode-se notar cada um dos Lócus do Cromossomo representa um nó da rede, logo tem-se um Cromossomo com 8 Genes visto que a rede tem 8 nós, além disso o Alelo do Lócus 7 é igual a 1, o que pode ser interpretado como a informação de que o chaveador óptico instalado no nó 7 está ligado enquanto os outros estão desligados (Alelos 0). Dessa forma, o

**Tabela 4** – Exemplo da estrutura básica de um cromossomo do BSN

Nó	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Cromossomo</b>	0	0	0	0	0	0	1	0

Fonte: Autoria Própria.

**Figura 11** – Representação da rede de exemplo utilizada no estudo de caso após acionamento do chaveador óptico.

Fonte: Autoria Própria.

Fenótipo deste indivíduo, ou seja, a interpretação deste Cromossomo, indica que o grafo desta rede deve ser representado considerando que o chaveador óptico referente ao nó 7 está acionado e os demais não, como representado na Figura 9c, convenientemente replicada na Figura 11.

### 3.2.3 FUNÇÃO DE *FITNESS*

Como em qualquer AG, o BSN baseia seu funcionamento na avaliação de uma função de *fitness*. Esta função, conforme brevemente descrito, está atrelada ao custo da rede. De maneira geral, o custo total da rede é calculado conforme descrito na Seção 3.2.1, com a diferença da necessidade de adoção de uma convenção em caso da avaliação de um grafo desconexo.

Basicamente, durante a execução do BSN podem ser geradas redes específicas onde nem todos os nós sejam acessíveis devido ao acionamento do chaveador óptico em posições inadequadas. Em outras palavras, podem existir Genótipos que dêem origem a redes cujos grafos são desconexos como o mostrado na Figura 5c. Neste caso, o custo da rede, de acordo com o descrito na Seção 3.2.1, seria infinito, visto que o custo unitário para alcançar o(s) vértice(s) não conectado(s) seria infinito. Logo, para representar este custo, visto que “infinito” não pode ser representado computacionalmente, adotou-se que o custo de um enlace como o descrito é igual a 1000 (mil unidades de custo). Dessa forma, o custo total da rede segue a Equação 1. Como consequência, o custo da rede deve conter uma parcela múltipla de 1000 no caso em que existam um ou mais nós sem conexão com o nó origem.

$$Fitness_{BSN} = \frac{1}{\sum_{n=1}^x custo(1,n)} \rightarrow custo(orig, dst) = \begin{cases} h.p, \text{ para n\u00f3 conectado} \\ 1000, \text{ para n\u00f3 desconectado} \end{cases} \quad (1)$$

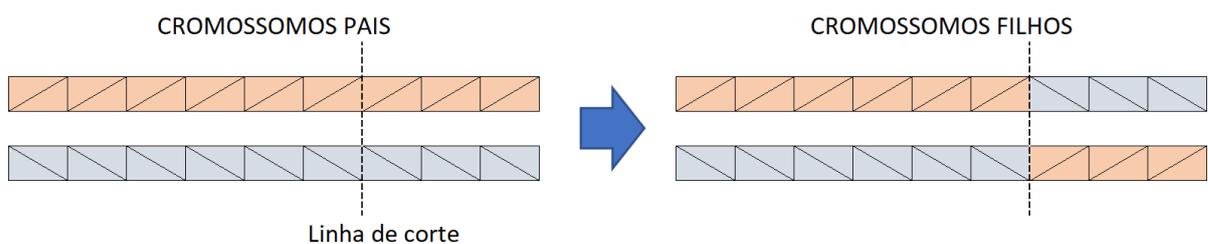
onde:  $x$  = n\u00famero de n\u00f3s;  $orig$  = v\u00e9rtice origem;  $dst$  = v\u00e9rtice destino;  $h$  = n\u00famero de saltos entre  $orig$  e  $dst$ ;  $p$  = custo do enlace.

Neste documento, para evitar o favorecimento de qualquer ramo dos grafos avaliados, o custo de todos os enlaces de n\u00f3s conexos \u00e9 mantido como sendo unit\u00e1rio. Sendo assim, quanto maior o custo da rede avaliada menor ser\u00e1 o valor de *fitness* da mesma, indicando que a rede em quest\u00e3o n\u00e3o \u00e9 bem adaptada ao problema. Desta forma, o objetivo do BSN \u00e9 a maximiza\u00e7\u00e3o do valor de *fitness*, o que implica na minimiza\u00e7\u00e3o do custo. Em outras palavras, atrav\u00e9s da maximiza\u00e7\u00e3o do *fitness* \u00e9 poss\u00edvel encontrar a configura\u00e7\u00e3o de rede mais bem adaptada (com menor custo) ao problema.

### 3.2.4 CROSSOVER

O processo de *Crossover* ou recombina\u00e7\u00e3o \u00e9 o respons\u00e1vel pela cria\u00e7\u00e3o de novos indiv\u00edduos, tamb\u00e9m chamados de filhos, que ser\u00e3o constituintes da nova gera\u00e7\u00e3o. Existem muitos m\u00e9todos diferentes que podem ser utilizados para esta opera\u00e7\u00e3o. A Figura 12 exemplifica o m\u00e9todo de *Crossover* simples, utilizado no BSN.

**Figura 12** – Exemplo de opera\u00e7\u00e3o de *Crossover* Simples.



**Fonte: A autoria Pr\u00f3pria.**

Como pode-se notar, dois cromossomos pais s\u00e3o escolhidos e um ponto de corte \u00e9 definido de maneira aleat\u00f3ria. Os cromossomos s\u00e3o ent\u00e3o divididos neste ponto de corte e recriados atrav\u00e9s da troca de informa\u00e7\u00f5es entre si. Desta forma, os cromossomos filhos s\u00e3o gerados atrav\u00e9s do compartilhamento de informa\u00e7\u00e3o gen\u00e9tica dos pais, criando um novo indiv\u00edduo com um novo valor de *fitness*.

### 3.2.5 SELEÇÃO

Paralelamente à Seleção Natural, os AGs utilizam-se de diferentes recursos para selecionar os indivíduos de cada geração mais adaptados ao problema em questão. O BSN utiliza o conceito de “*Roulette Wheel*” (GOLDBERG, 1989).

Neste tipo de seleção toda a população é avaliada de maneira a criar uma correlação percentual entre o valor de *fitness* de cada um dos indivíduos e sua representatividade perante toda a população. Desse modo pode-se ter um indicativo de quão adaptado cada um deles é com relação a sua geração corrente, e então é possível criar uma distribuição de probabilidades para a escolha de cada um dos mesmos no processo de reprodução.

Seguindo esse critério, os pais que irão fornecer o código genético para a nova geração, deverão potencialmente ser os mais adaptados ao problema em questão aumentando a chance de criar descendentes ainda mais adaptados e, desta forma, acelerando a convergência do algoritmo. A Tabela 5 exemplifica este critério de seleção. Conforme pode ser visto, o indivíduo  $\beta$  possui um *fitness* de 130, que corresponde a um índice de adaptabilidade ao problema proposto de 43,33%. Logo ele possui 43,33% de chance de ser escolhido para reprodução enquanto o indivíduo  $\alpha$  possui apenas 11,33% de chance de ser escolhido.

**Tabela 5** – Exemplo de aplicação do Método de Seleção “*Roulette Wheel*”

<b>Indivíduo</b>	<b><i>Fitness</i></b>	<b>Percentual do Total</b>
$\alpha$	34	11,33%
$\beta$	130	43,33%
$\delta$	66	22%
$\theta$	70	23,33
<b>Total</b>	<b>300</b>	<b>100%</b>

**Fonte: Autoria Própria.**

### 3.2.6 DIMENSÃO DAS POPULAÇÕES

O sucesso de qualquer AG está intrinsecamente relacionado ao tamanho de sua população inicial e das subsequentes gerações. Caso a quantidade de indivíduos em cada uma delas seja muito grande ou muito pequena a evolução dos mesmos pode ser comprometida. Segundo Goldberg (1989) estes parâmetros devem ser estabelecidos baseados na disponibilidade dos recursos computacionais utilizados.

Para as simulações do BSN foram utilizadas populações de 500 indivíduos, este valor mostrou-se suficiente para alcançar valores ótimos de custo em várias redes de teste e foi

adotado como padrão para as simulações posteriormente descritas.

### 3.2.7 PARÂMETROS ADOTADOS

Para a utilização do BSN, assim como em qualquer AG, alguns parâmetros básicos precisam ser configurados. A Tabela 6 mostra os parâmetros utilizados nas simulações do BSN apresentadas na Seção 4. Esses parâmetros foram selecionados com base em um *tradeoff* entre garantia de obtenção do ótimo global e tempo de processamento. Para isso foram realizadas 100 simulações com redes cujas árvores geradoras mínimas eram previamente conhecidas a fim de garantir que os parâmetros escolhidos seriam suficientemente abrangentes para permitir que o BSN convergisse para o ótimo global de cada uma delas.

Valores muito menores do que os escolhidos para tamanho de população podem comprometer a diversidade de indivíduos disponíveis em cada uma das gerações, impactando na convergência do algoritmo. Da mesma forma, um menor número de gerações pode fazer com que o algoritmo seja finalizado antes de alcançar o ótimo global tendo o mesmo tipo de impacto no resultado final. A probabilidade de *Crossover* representa a chance de indivíduos, já selecionados pelo método de *Roulette Wheel*, efetivarem o processo de reprodução ao invés de serem simplesmente perpetuados para a próxima geração. Logo faz sentido que este parâmetro contenha um valor alto, visto que no paralelo da natureza, dificilmente um indivíduo altamente adaptado alcançaria o fim da vida sem reproduzir-se. Enquanto isso, valores de mutação esperados são sempre baixos.

De maneira geral, pode-se dizer que uma mutação não é algo desejável mas um estudo mais aprofundado revela que a mutação é essencial em situações onde todos os indivíduos já apresentam um bom valor de adaptação (representado pelo valor do *fitness*) ao problema. Neste caso é possível que todos os indivíduos estejam muito próximos de um ótimo local que, porventura, pode não corresponder ao ótimo global. Nesta situação é possível que todos indivíduos comecem a convergir para este ótimo local e, no pior caso onde todos os indivíduos seriam iguais, o processo de reprodução através de *Crossover* não surtiria efeito algum. Neste ponto, a ferramenta para a criação de um indivíduo diferente dos demais, possivelmente capaz de direcionar todo o processo de reprodução para um novo ótimo, possivelmente global, é a mutação.

Valores mais exigentes do que os escolhidos representam sobrecarga do algoritmo e impactam na utilização de mais recursos computacionais e mais tempo de simulação sem melhorar o resultado final. Estes valores são utilizados para o BSN independentemente do cenário ou topologia de rede escolhidos

**Tabela 6** – Parâmetros básicos utilizados no algoritmo do BSN

Tamanho da População	Número de Gerações	Método de escolha de indivíduo para reprodução	Probabilidade de <i>Crossover</i>	Probabilidade de Mutação
500	50	<i>Roulette Wheel</i>	94%	0,5%

Fonte: Autoria Própria.

### 3.3 GERADOR DE TOPOLOGIAS

Com o intuito de possibilitar a avaliação da metodologia proposta foram consideradas diversas configurações de rede diferentes. Para isso foi criado, em caráter de contribuição para o presente trabalho, um Gerador de Topologias responsável por alimentar o BSN com grafos que são utilizados como redes a serem otimizadas.

Apesar de o Gerador de topologias não fazer parte da proposta apresentada neste documento ele é de suma importância na geração de dados coerentes ao cenário considerado. A Figura 13 evidencia a separação entre o BSN e o Gerador de Topologias. Sua principal função é servir como intermediário entre o o BSN e o usuário. Lembrando que o objetivo principal, neste documento, é a avaliação da metodologia e não sua aplicação em uma topologia de rede específica. Desta forma, fica óbvio que para a utilização do BSN em uma situação real o Gerador de Topologias não seria usado, sendo necessário apenas alimentar o BSN com os dados da rede objetivo.

**Figura 13** – Representação em blocos básica de posicionamento do Gerador de Topologia na solução apresentada



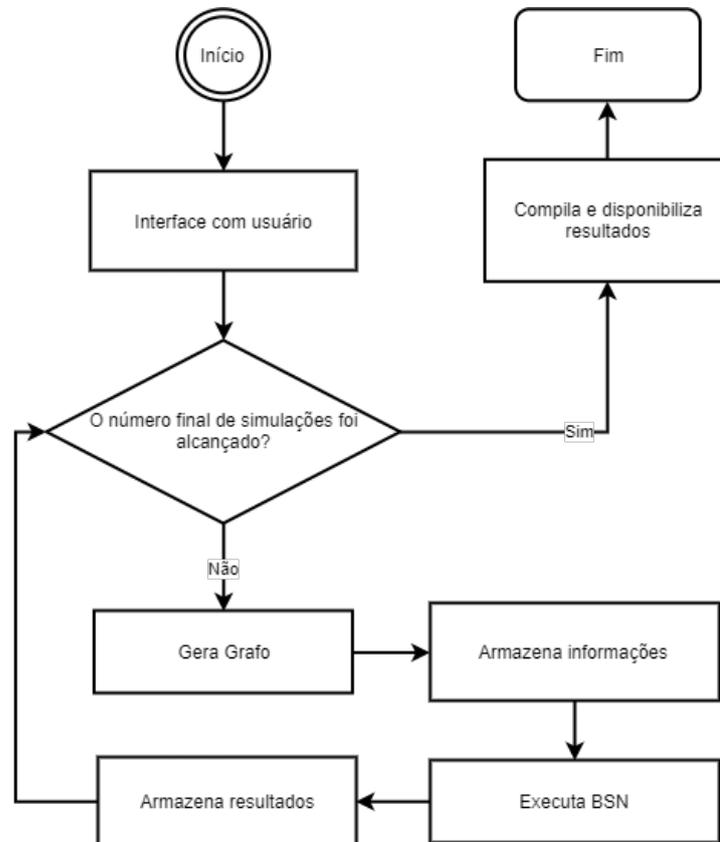
Fonte: Autoria Própria.

A dinâmica de funcionamento do Gerador de Topologias é descrita basicamente pelo fluxograma da Figura 14.

A seguir é apresentada uma descrição sucinta dos passos representados neste fluxograma

**Interface com o usuário** representa a requisição de informações de número de nós inicial e final, valência máxima inicial e final, vértice raiz considerado, número de gerações e

**Figura 14** – Representação do fluxograma básico do funcionamento do Gerador de Topologias criado para o BSN



**Fonte: Autoria Própria.**

tamanho de cada uma delas por parte do usuário. Estas informações são utilizadas na geração dos grafos a serem utilizados pelo BSN.

**Gera Grafo** representa o passo em que é gerado um grafo aleatório de acordo com as premissas adotadas e valores dos parâmetros adquiridos. No presente documento todas as conexões criadas pelo Gerador de Topologias tiveram custo unitário, visando evitar o favorecimento de qualquer um dos ramos do grafo gerado.

**Armazena Informações** é a função onde as informações e características do grafo gerado são armazenadas em arquivo para análise posterior.

**Armazena Resultados** é o ponto do código onde os resultados alcançados com a execução do BSN são armazenados em arquivo para análise posterior.

**Executa BSN** é na verdade o ponto de interligação entre o Gerador de Topologias e o Algoritmo do BSN. É neste passo em que o grafo de rede gerado pelo Gerador de Topologias é enviado ao BSN para otimização.

Como pode-se perceber o objetivo básico do programa é o de proporcionar a execução do BSN à partir de diferentes configurações de rede de maneira automatizada. Entretanto, um dos passos representados na Figura 14 envolve a criação automática de grafos e merece atenção especial.

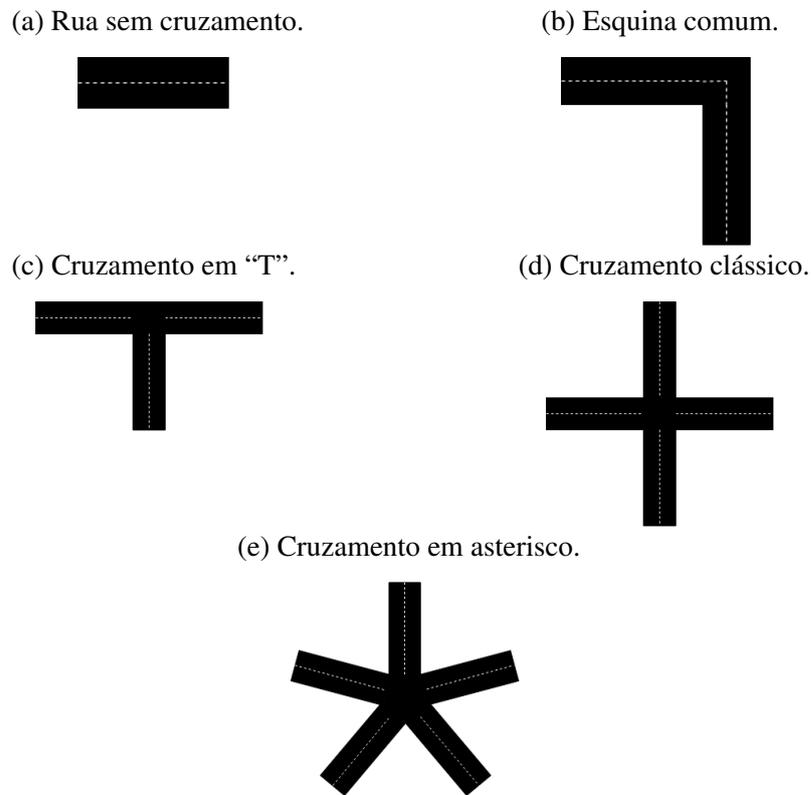
De acordo com o que foi anteriormente explicado neste documento, o BSN foi originalmente desenvolvido para aplicações em redes SG, principalmente considerando o cenário de distribuição de energia elétrica, logo faz-se necessária a análise de topologia deste tipo de rede, de maneira a criar um algoritmo capaz de gerar grafos condizentes com a realidade apresentada nestes cenários.

De acordo com (Sood et al., 2009), tipicamente existem dois cenários em aplicações SG para distribuição de energia elétrica: um ambiente rural pouco populado ou um ambiente urbano densamente populado e naturalmente conectado em malha. No caso do ambiente rural o desempenho do BSN, obviamente, pode não apresentar grandes benefícios, visto que as redes de comunicação utilizadas nestes cenários devem dificilmente apresentar alguma redundância. Em contrapartida, as redes presentes nos grandes centros urbanos (densamente populados e naturalmente conectadas em malha) são o objetivo principal da presente proposta, conforme explicado anteriormente.

De maneira geral as redes de distribuição de energia elétrica seguem a topologia da cidade em que são instaladas, ou seja, a disposição das ruas por onde passam. Desta forma fica fácil perceber que as interligações entre equipamentos irão também estar dispostas de acordo com essa premissa. A Figura 15 apresenta algumas das possibilidades mais comuns de disposição de ruas por onde a rede de distribuição deve passar.

Ruas como a representada na Figura 15a podem conter equipamentos ligados em série ou, eventualmente, equipamentos “terminais” que possuam apenas uma conexão com o resto da grade como no caso de uma rua sem saída, por exemplo. Esse padrão de interligação não muda muito ao considerar ruas como a representada na Figura 15b. No caso dos cruzamentos como o representado na Figura 15c fica fácil perceber que podem ser instalados equipamentos com até 3 caminhos redundantes em fibra-óptica. Este número aumenta para 4 caminhos redundantes em cruzamentos similares ao da Figura 15d e 5 para os da Figura 15e.

Obviamente a Figura 15 não representa todos os tipos de cruzamentos possíveis e podem ser encontrados outras topologias aqui não mostradas. Entretanto é importante lembrar que para o objetivo específico a que se propõe o presente trabalho, uma redundância de rota pode ser literalmente traduzida como uma redundância de caminho. Ou seja, em um cruzamento como o representado na Figura 15c não faz sentido utilizar um equipamento com mais de

**Figura 15** – Tipos comuns de cruzamento

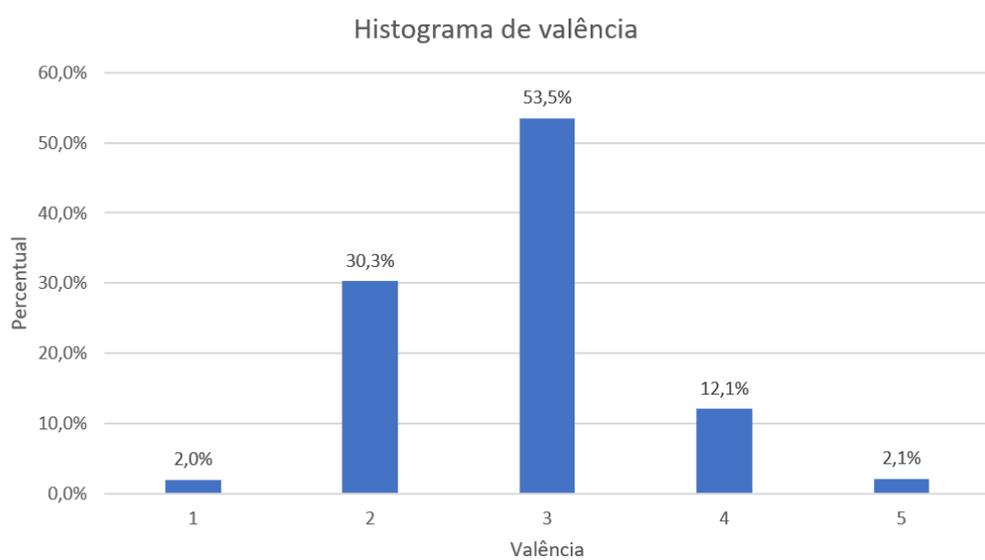
**Fonte: Autoria Própria.**

3 interconexões lógicas visto que neste caso 2 delas deveriam obrigatoriamente chegar ao equipamento utilizando a mesma via de acesso. Isso representaria uma grande falha de projeto, visto que a redundância oferecida por esta conexão extra seria completamente ineficaz no caso de um acidente como o rompimento de um cabo ou apagão. O mesmo princípio se aplica aos demais cruzamentos.

Desta forma, pode-se considerar que para o tipo de rede a que o BSN se propõe, as interconexões entre os equipamentos devem seguir uma distribuição de probabilidades que represente as características físicas da aplicação alvo. Com este intuito, foi realizada a análise de algumas redes SG reais brasileiras resultando na distribuição de probabilidades representada na Figura 16. Esta distribuição foi a utilizada no Gerador de Topologias, definido neste documento, para a geração dos grafos a serem utilizados na avaliação da proposta do BSN, visando dessa forma representar com maior fidedignidade as redes SG reais.

Em outras palavras o Gerador de Topologias implementado é capaz de gerar grafos aleatórios com topologia em malha seguindo a distribuição de probabilidades de interconexões (valência máxima) apresentada na Figura 16, assemelhando-se dessa forma, o máximo possível, ao tipo de topologia encontrado na aplicação considerada.

**Figura 16** – Distribuição de probabilidade de interligação de equipamentos em redes SG de distribuição de energia elétrica



**Fonte: Autoria Própria.**

## 4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos após diversas simulações. Os resultados são apresentados sob duas óticas distintas através da análise dos custos totais e individuais.

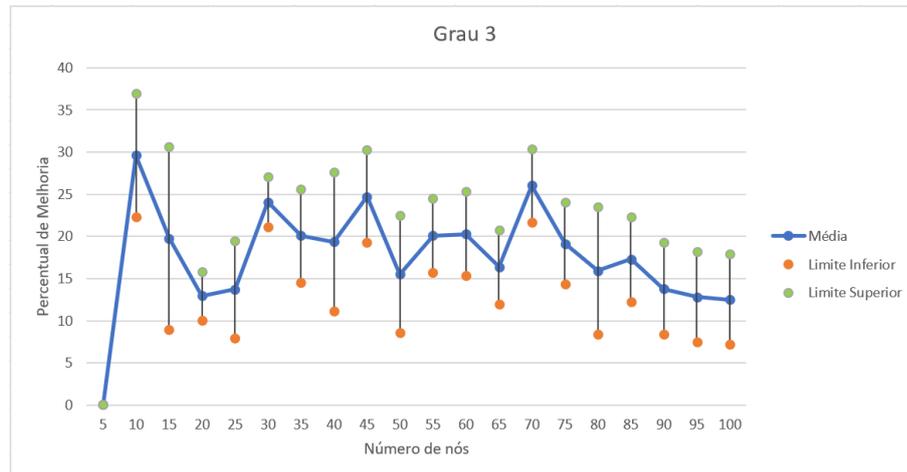
### 4.1 ANÁLISE DE CUSTO TOTAL

Para avaliação do desempenho do BSN foram utilizadas redes criadas aleatoriamente seguindo as premissas de distribuição de probabilidade descritas na Seção 3.3. O Gerador de Topologias foi configurado para gerar redes de 5 a 100 nós com passo incremental de 5 unidades, ou seja, foram geradas redes de 5, 10, 15 e assim sucessivamente até 100 nós. Além disso em todas as dimensões de rede foram geradas pelo menos 3 amostras onde uma delas foi limitada a grafos com valência máxima de 3 conexões, a outra com valência máxima de 4 e por fim 5 conexões, tendo por objetivo avaliar a utilização da metodologia proposta diante do aumento de interconexões máximas em cada nó. É importante notar que o parâmetro alterado em cada um dos casos citados é o de valência máxima (ou grau máximo conforme mencionado na Seção 2.4), ou seja, apesar de ainda seguir a distribuição de probabilidade de interconexões mostrada na Figura 16, que representa a topologia física de uma cidade (e que por consequência não é facilmente alterável), simula-se desta forma a utilização de equipamentos com menor número de conexões do que o possível. Fato este recorrente no mundo real devido a limitações de orçamento ou dificuldades de lançamento/instalação de fibras ópticas, ou seja, mesmo em situações onde existe a possibilidade de conexão com vários equipamentos elas não são necessariamente realizadas. Por fim, cada uma das redes foi submetida à execução do BSN configurado com os parâmetros descritos na Seção 3.2.7, conforme representado na Tabela 6.

O ganho percentual do custo total da rede está representado nas Figuras 17 a 19. Foram realizadas 5 execuções, onde para cada uma delas são geradas 60 redes aleatoriamente, seguindo as premissas anteriormente expostas. Ou seja, para cada um dos pontos plotados nas Figuras 17 a 19 foram utilizadas 300 redes diferentes, sendo que cada uma delas teve seu custo total original (antes da utilização do BSN) comparado com o custo total final (após a utilização do

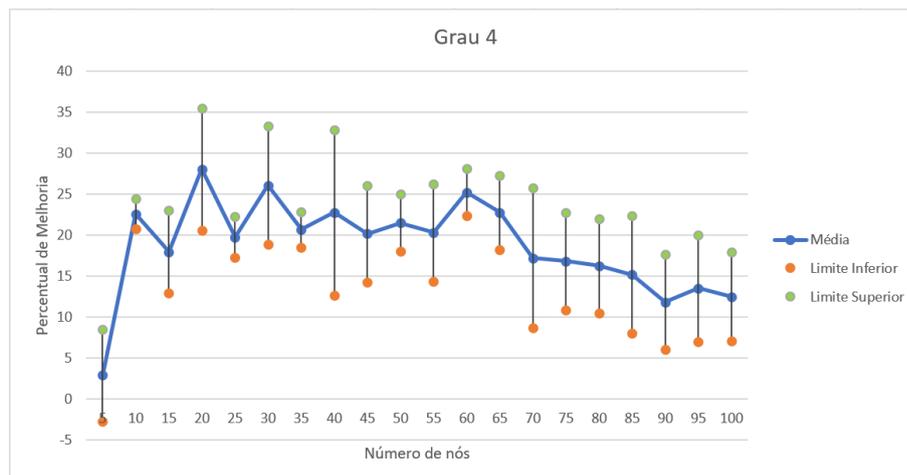
BSN) resultando em um percentual de melhoria. As figuras citadas representam a compilação destes percentuais de melhoria, separados por número de nós das redes geradas (tamanho das redes), para um intervalo de confiança de 95%.

**Figura 17** – Percentual de melhoria no parâmetro de custo máximo da rede após aplicação do BSN considerando grau máximo 3 para um intervalo de confiança de 95%.



**Fonte: Autoria Própria.**

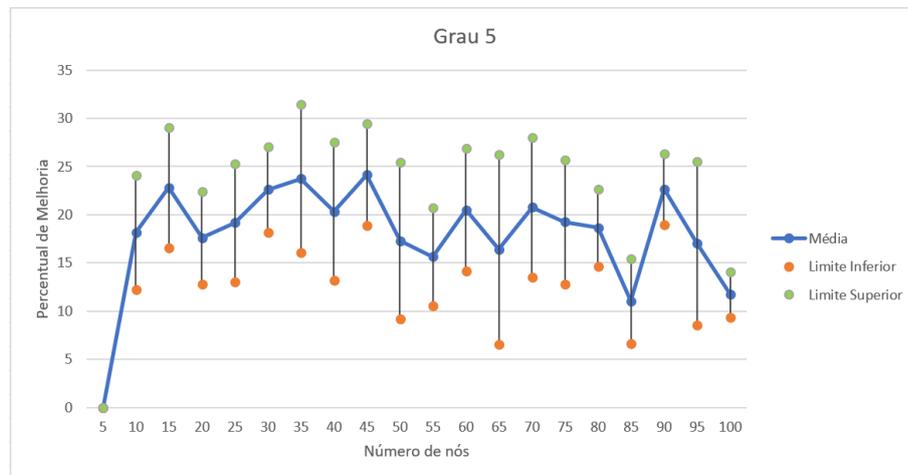
**Figura 18** – Percentual de melhoria no parâmetro de custo máximo da rede após aplicação do BSN considerando grau máximo 4 para um intervalo de confiança de 95%.



**Fonte: Autoria Própria.**

Pode-se notar que para todos os casos os resultados demonstram ganhos percentuais no custo total da rede, porém com grande variação, visto que as redes submetidas ao BSN foram completamente diferentes entre si. Desta forma pode-se afirmar que o comportamento da metodologia, como esperado, está intrinsecamente relacionada à topologia da rede original, visto que é esta topologia que irá gerar novos grafos quando do acionamento dos chaveadores

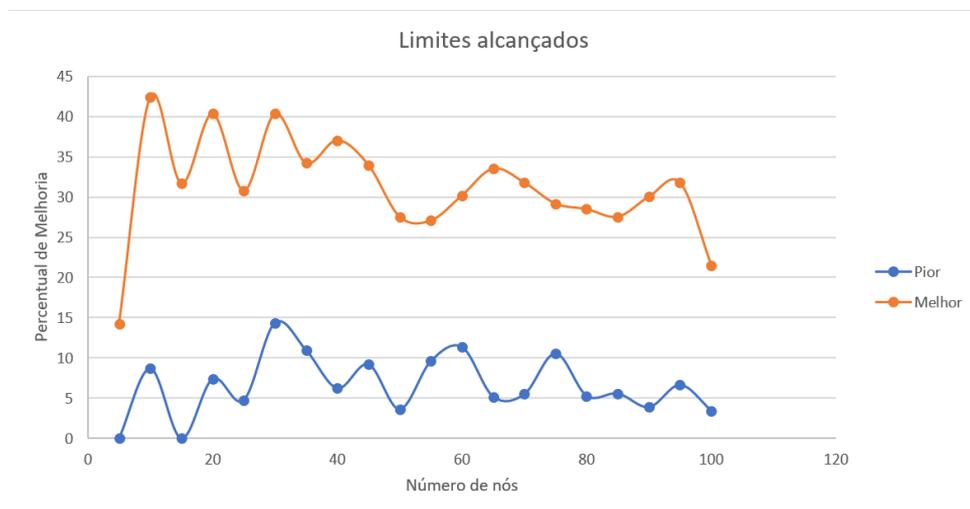
**Figura 19** – Percentual de melhoria no parâmetro de custo máximo da rede após aplicação do BSN considerando grau máximo 5 para um intervalo de confiança de 95%.



**Fonte: Autoria Própria.**

ópticos. Sendo assim pode-se extrair, dentre todas as execuções, o pior e melhor caso de atuação do protocolo considerando os graus máximos 3, 4 e 5, representado na Figura 20.

**Figura 20** – Gráfico percentual comparativo entre os melhores e os piores resultados de melhoria alcançados pelo o BSN utilizando valores absolutos.



**Fonte: Autoria Própria.**

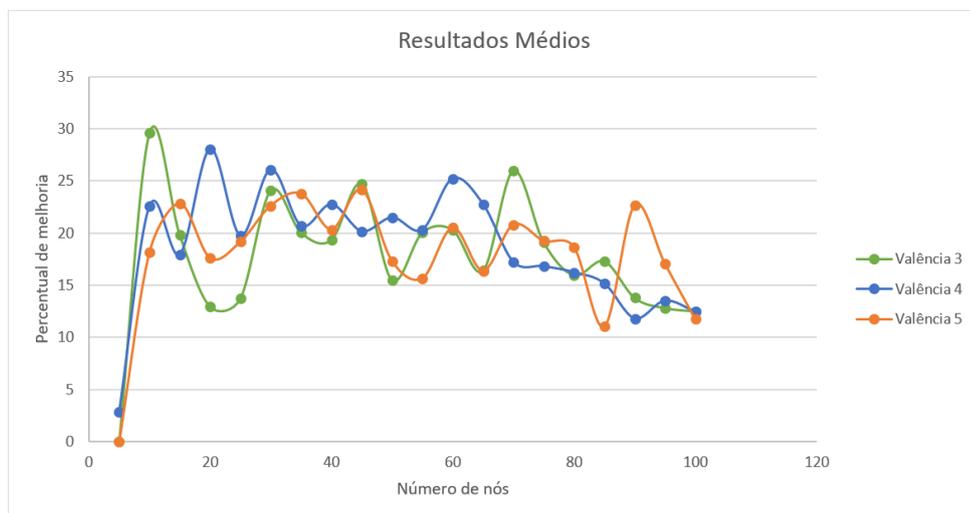
Como pode-se perceber algumas redes avaliadas foram tão desfavoráveis à aplicação do BSN que não apresentaram nenhuma melhoria, este é o caso mostrado na curva do pior desempenho da Figura 20 (gráfico mostrando os piores e melhores desempenhos em percentual de melhoria entre todas as redes utilizadas para a geração dos dados apresentados nas Figuras 17 a 19) para 5 e 15 nós. De maneira geral é fácil imaginar redes onde esse comportamento seja esperado, como aquelas em que não existam muitas redundâncias ou que eventualmente

tenham grandes trechos em série (trechos com equipamentos que possam ser representados no grafo da rede por vértices de grau 2). Obviamente a probabilidade de se gerar uma rede como estas com um menor número de nós é muito maior do que considerando um grande número de nós, fato este que pode ser verificado no presente estudo visto que nenhuma rede maior apresentou o mesmo “pior” desempenho.

Em contrapartida, ainda analisando-se o gráfico da Figura 20, pode-se notar um percentual de melhoria muito alto para redes propícias a multipercursos (redes onde a topologia inicial possibilita a utilização do BSN por conter redundâncias), podendo chegar em alguns casos a níveis ao redor de 45% de melhoria considerando-se o custo total da rede antes e depois da utilização do BSN.

A Figura 21 mostra os resultados médios das mesmas 5 execuções da simulação que geraram as Figuras 17 a 19. Como pode-se observar o desempenho do BSN é muito mais afetado pelo número de nós do que pelo grau máximo do grafo utilizado.

**Figura 21** – Gráfico percentual comparativo de resultados médios de melhoria de custo total entre redes de diferentes valências.

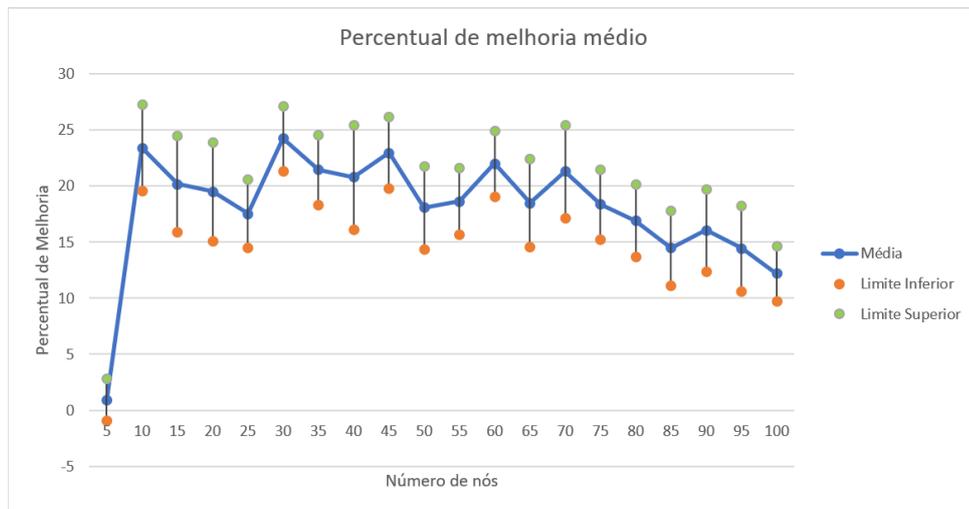


**Fonte: Autoria Própria.**

Baseando-se na conclusão de que a influência do grau no desempenho do BSN não é relevante pode-se gerar um gráfico que mostre o percentual de melhoria de custo total considerando apenas o número de nós das redes avaliadas. Para isso foram utilizadas 300 redes diferentes resultando no gráfico da Figura 22, cujo intervalo de confiança utilizado é de 98%. Aqui fica claro uma diminuição no percentual de melhoria com o aumento do número de nós da rede utilizada.

Para entender este fenômeno é necessário analisar não apenas o custo total da rede,

**Figura 22** – Gráfico percentual comparativo de resultados médios de melhoria de custo total entre redes de diferentes tamanhos considerando um intervalo de confiança de 98%.

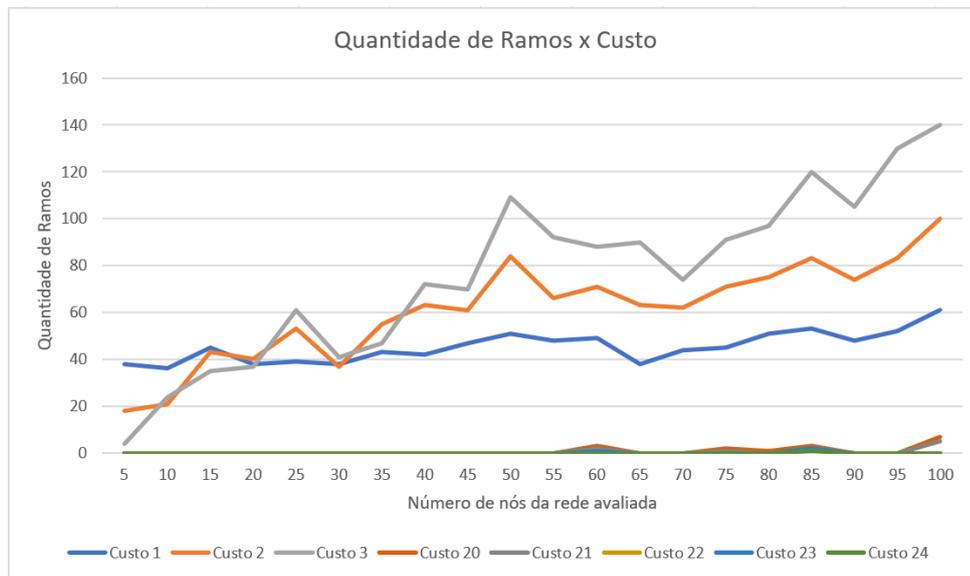


**Fonte: Autoria Própria.**

mas também o que acontece com cada um dos ramos da mesma após a utilização do BSN. Para isso, foram analisados todos os ramos existentes nas 300 redes avaliadas (mais de 18.000 ramos) assim como os seus respectivos custos, resultando no gráfico da Figura 23. Este gráfico mostra a evolução da quantidade de ramos nas redes avaliadas frente ao aumento do número de nós das mesmas, sendo que apenas os ramos com os menores custos (custos 1, 2 e 3) e os com maiores custos (custos 20, 21, 22, 23 e 24) foram representados.

A Figura 23 mostra claramente que, além de a quantidade de ramos com custo baixo ser expressivamente maior que a quantidade de ramos com custo alto, o aumento da quantidade de ramos com custos mais baixos é muito mais agressivo que o aumento da quantidade de ramos com custo alto. Em outras palavras, ao aumentar o tamanho da rede pode-se esperar muito mais ramos com custo baixo do que ramos com custo alto. O gráfico mostrado na Figura 24 confirma este fato, nele é possível ver a quantidade de ramos de cada custo na composição das redes avaliadas neste documento.

Para criação do gráfico mostrado na Figura 24 foram utilizadas todas as redes criadas para a avaliação do BSN assim como os ramos constituintes das mesmas. No eixo esquerdo das ordenadas é possível ver a quantidade de cada um dos custos existentes enquanto no eixo da direita é possível ver o percentual acumulado de formação das redes. Nesta curva pode-se verificar que cerca de 80% das redes são formadas por ramos cujos custos estão abaixo de 10, ou seja, as redes consideradas possuem muito mais ramos de baixo custo que de alto considerando que o custo máximo encontrado foi de cerca do dobro (mais precisamente 24).

**Figura 23** – Gráfico de quantidade de ramos por custo para diferentes tamanhos de rede.

**Fonte: Autoria Própria.**

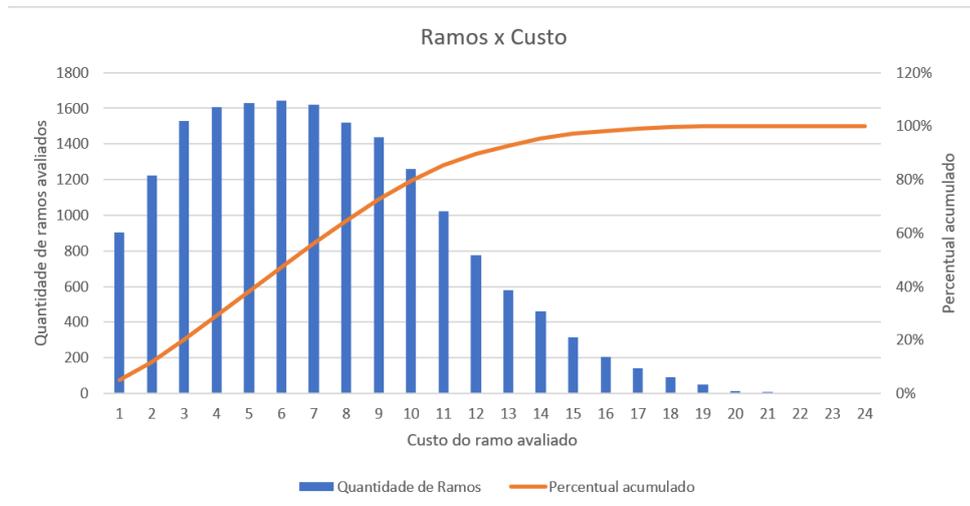
Desta forma, para o correto entendimento do efeito observado na melhoria de custo total retratado na Figura 22 (diminuição no percentual de melhoria com o aumento do número de nós da rede utilizada), é importante considerar tanto a proporção entre a quantidade de ramos de baixo e alto custo, conforme anteriormente citado, quanto o efeito da otimização do BSN em cada um dos ramos. Ou seja, o quanto cada um dos ramos de diferentes tamanhos é impactado em custo após a utilização do BSN. Esta análise será descrita na Seção 4.2.

#### 4.2 ANÁLISE DE CUSTO INDIVIDUAL

O BSN foi desenvolvido para redução da profundidade da rede, e conseqüentemente sua latência, através da minimização do número de saltos considerando toda a rede avaliada. Porém, conforme explicitado na Seção 3.2.1, além de significativa melhora no custo total da rede, o BSN também apresenta um resultado muito interessante ao avaliar-se o custo individual para comunicação entre o nó central, escolhido em todas as topologias de maneira aleatória, e cada um dos demais. De maneira geral, o algoritmo pode ser aplicado para diferentes objetivos de acordo com a função de *fitness* utilizada, sendo que no presente caso esse valor é calculado conforme apresentado na Equação 1.

Mudando o enfoque utilizado na Seção 4.1 para a análise dos resultados e avaliando os custos unitários de cada rota pode-se obter o gráfico apresentado na Figura 25.

Para a geração da Figura 25 foram consideradas todas as redes geradas pelo Gerador de

**Figura 24** – Gráfico da quantidade e custos dos ramos que constituem uma rede.

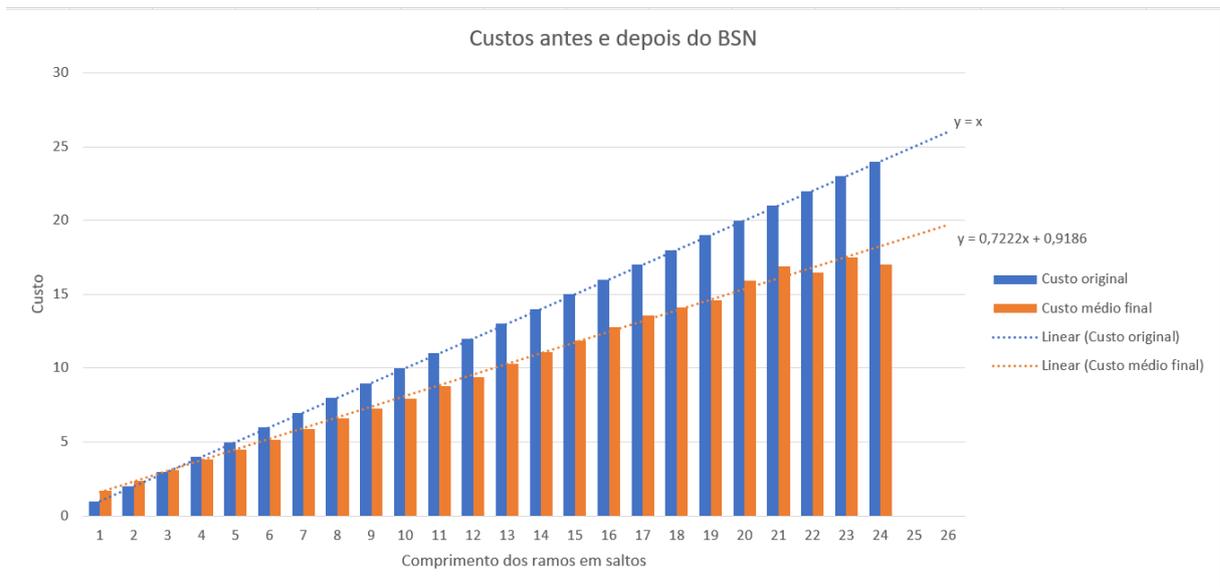
**Fonte: Autoria Própria.**

Topologias como entrada para o BSN conforme descrito na Seção 4.1. Cada uma das conexões (ramos do grafo que realizam a interconexão entre o vértice origem e cada um dos destinos) de cada uma das redes foi avaliada e catalogada segundo seu custo original, ou seja, o custo do enlace antes da execução do BSN, considerado neste documento como sendo igual ao número de saltos. Resultando dessa forma em um total de 18052 conexões avaliadas. Após este passo, o custo resultante para cada um dos destinos dessas conexões, após a otimização do BSN, foi avaliado. Dessa forma é possível saber o desempenho do BSN através da comparação de todos os destinos cujos custos no grafo da rede original eram de 1, 2, 3 e assim por diante frente aos novos custos obtidos nas redes resultantes após a aplicação do BSN.

Seguindo esta premissa, na Figura 25, as barras denominadas de “Custo original” representam o custo dos ramos do grafo avaliados antes da utilização do BSN, enquanto as barras denominadas de “Custo médio final” representam a média de todos os custos resultantes após a utilização do BSN. Pode-se notar que para custos muito baixos, o BSN, de modo geral, pode apresentar um resultado pior do que o da rede original, mas essa situação muda drasticamente para custos maiores. Na verdade à partir de 3 saltos entre origem e destino o BSN passa a resultar em vantagem quando comparado à rede original.

As redes geradas pelo Gerador de Topologias utilizado neste documento foram construídas à partir da geração aleatória de grafos seguindo a distribuição de probabilidades de conexão mostrada na Figura 16. Foram geradas redes de 5 a 100 nós, resultando em grafos cujo número de saltos máximo foi de 24, sendo que para este caso conseguiu-se uma melhoria média de cerca de 30%.

**Figura 25** – Gráfico comparativo de resultados médios de melhoria de custo individual para cada rota.



**Fonte: Autoria Própria.**

A Figura 25 conta também com duas linhas de tendência lineares simbolizando a evolução do custo em uma rede comum (sem a utilização do BSN), representada pela linha “Linear (Custo original)” e em uma rede após a utilização do BSN, representada pela linha “Linear (Custo médio final)”. As equações de reta de cada uma das linhas de tendência estão presentes na Figura 25 e são novamente representadas por conveniência nas Equações 1, representando a evolução do custo em uma rede sem a utilização do BSN frente ao aumento do número de saltos, e 2, representando a evolução do custo em uma rede após a utilização do BSN frente ao aumento do número de saltos na topologia original.

$$y = x \quad (1)$$

$$y = 0,7222x + 0,918 \quad (2)$$

$$\alpha = \tan^{-1}(a) \therefore \alpha = \tan^{-1}(0,7222) \approx 35,84^\circ \quad (3)$$

Substituindo-se 1 em 2 tem-se que o ponto de encontro das duas retas é em 3,3 representando o ponto de inflexão na utilização da proposta. Ou seja, conforme já mencionado, à partir de 3 saltos o BSN começa a fornecer resultados mais vantajosos do que os obtidos na rede original. Além disso, pode-se utilizar a Equação 2 para prever o custo médio alcançado

em ramos de rede mais compridos que os avaliados, visto que o coeficiente angular desta reta representa um ângulo menor que 45 graus conforme representado na Equação 3, pode-se perceber que o custo alcançado através da utilização do BSN tende a ser sempre e cada vez menor com relação ao custo da rede original.

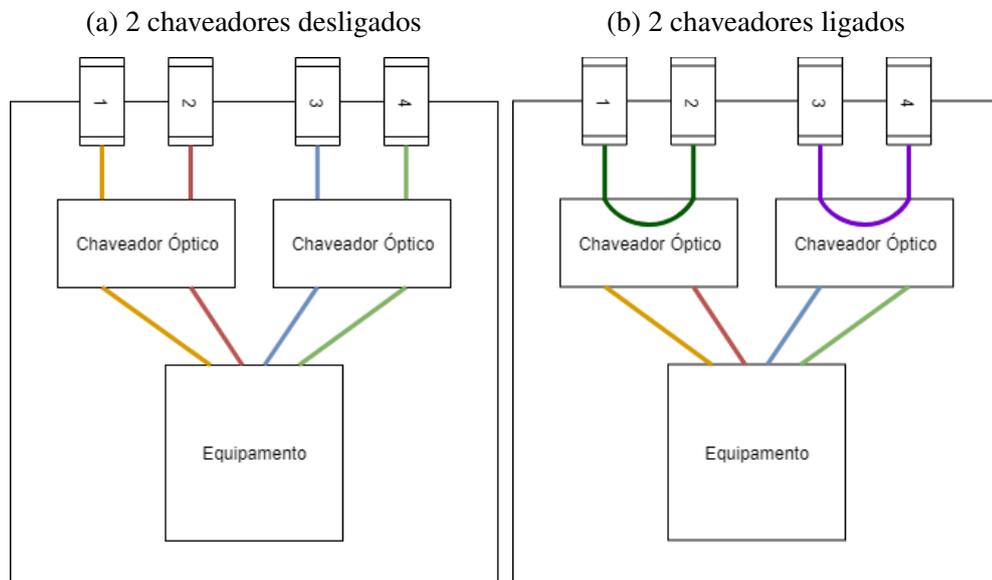
Dessa forma, pode-se afirmar que o emprego do BSN habilita a utilização de redes muito maiores do que as atuais, visto que o principal limitante para o número de nós das redes SGs (latência devido a múltiplas retransmissões de pacotes) é o fator mais reduzido pela metodologia apresentada. Como exemplo, utilizando a Equação 2 e considerando um ramo de rede hipotético com 100 saltos na topologia original, pode-se prever que após a utilização do BSN este mesmo ramo resulte em um novo caminho com aproximadamente 73 saltos, representando uma redução de 27% em relação à topologia original. Em outras palavras, pontos da cidade que não poderiam originalmente ser atendidos pelo SG devido à distância com relação ao centro de controle, podem passar a ser considerados como alcançáveis, após a utilização do BSN, representando grande economia para a distribuidora de energia em questão.

### 4.3 DISCUSSÕES

A metodologia aqui apresentada tem o caráter de prova de conceito, sendo desta forma passível de aperfeiçoamentos. Em outras palavras existem limitações que se resolvidas devem fazer com que a metodologia apresente resultados ainda melhores do que os mostrados. As limitações aqui discutidas são decorrentes do cenário de aplicação considerado, sendo que desta forma não estão ligadas diretamente com a proposta apresentada mas sim com os resultados obtidos.

O perfil de rede de comunicação considerado na presente proposta costuma ser instalado em ambientes físicos não favoráveis à manutenção (equipamentos no alto de poste sem sistema de ventilação e costumeiramente expostos à intempéries). Somando-se a isso o fato de que possíveis problemas técnicos relacionados com a infraestrutura deste tipo de redes podem acarretar em grandes prejuízos monetários, resulta-se em administradores de rede extremamente conservadores com relação a manutenções e/ou pontos de falha. Desta forma, previu-se a utilização de apenas um chaveador óptico por equipamento, o que em si não acarreta maiores problemas visto que de acordo com a distribuição de probabilidades de interconexão utilizada (Figura 16) 98% dos equipamentos encontrados em campo devem ter a disponibilidade de no máximo 4 conexões ópticas. Logo, caso um destes equipamentos tenha mais de um chaveador óptico acionado ao mesmo tempo ele perderá a conexão com a rede, sendo impossível acessá-lo novamente. A Figura 26 representa este estado, nela

**Figura 26** – Representação da utilização de mais de um chaveador óptico 2x2 em equipamentos contando com apenas 4 portas ópticas.



**Fonte: Autoria Própria.**

um equipamento com 4 *transceivers* é representado em conjunto com 2 chaveadores ópticos 2x2 ligados a quatro pontos de entrada/saída de sinais, os segmentos de reta utilizados para interligar cada um destes estágios são diferenciados por cores e representam cada uma das interligações físicas feitas pelas fibras ópticas. Em 26a pode-se ver que o sinal de todas as fibras é encaminhado para o equipamento normalmente. Em contrapartida, na situação retratada em 26b todos os sinais de entrada são redirecionados impedindo que o equipamento receba qualquer informação.

Neste sentido, ao mesmo tempo que a utilização de apenas um chaveador óptico representa o estilo conservador marcante no cenário utilizado, também configura uma limitação na utilização da metodologia, visto que para cada equipamento em campo existe apenas uma opção de acionamento de chaveador óptico, reduzindo assim pela metade o universo de possíveis novas topologias a serem formadas pelo BSN.

Além disso, outra importante limitação advinda da utilização de apenas um chaveador óptico é a obrigatoriedade de interconectar, quando necessário, sempre as mesmas portas ópticas. O que também provoca a mesma limitação citada quanto à diminuição do universo de possíveis novas topologias.

É importante salientar que os chaveadores ópticos considerados neste documento são bidirecionais 2x2, o que significa que funcionam de acordo com o descrito na Seção 2.3 conforme o diagrama em blocos da Figura 4. Entretanto a abordagem utilizada na proposta não

está limitada a este tipo de chaveador, podendo ser adaptada a modelos diferentes.

## 5 CONCLUSÃO

Foi exposto um trabalho de pesquisa na área de redes de computadores e a utilização de componentes, como os chaveadores ópticos, capazes de provocar alterações em camada física de maneira independente do protocolo de roteamento utilizado. Foram mostrados conceitos básicos relacionados a protocolos de roteamento assim como alguns protocolos relacionados ao ambiente ao qual a proposta se destina. Também estudaram-se os principais requisitos e serviços de redes inteligentes de distribuição de energia elétrica - SGs, verificando-se que alguns desses serviços possuem requisitos severos em termos de latência, principalmente em se tratando de serviços de proteção e automação, o que conseqüentemente limita o tamanho/profundidade máxima da rede.

Além disso, o presente trabalho mostrou conceitos básicos de computação evolucionária, empregando algoritmos genéticos na criação da proposta de uma metodologia, nomeada de BSN - “*Bypass* Seletivo de Nós”, destinada a melhorar os valores de latência de uma rede óptica através da manipulação de chaveadores ópticos estrategicamente selecionados, de maneira a diminuir o número de saltos entre a origem e destino de uma comunicação.

Para avaliação de desempenho da metodologia proposta foi desenvolvido um gerador de topologias capaz de gerar grafos aleatórios seguindo uma distribuição de probabilidade de interconexão condizente com a realidade do ambiente ao qual a proposta se destina. Os grafos resultantes foram então submetidos ao algoritmo do BSN, responsável por gerar os dados apresentados.

De acordo com o apresentado na seção 4, fica claro que a efetividade do algoritmo proposto está intrinsecamente ligada à topologia da rede que será submetida ao mesmo. O que já era esperado, visto que a possibilidade de rearranjo da camada física conseguida através da utilização dos chaveadores ópticos e conseqüente alteração da topologia resultante depende de como e quantos nós estão interligados na rede original. Mesmo assim, pode-se notar uma sensível melhora nos parâmetros de custo ou profundidade da rede resultante em detrimento de sua largura quando comparada ao grafo da rede original. Em outras palavras, o BSN tem a capacidade de converter uma rede profunda em uma rede larga, obviamente sujeito às limitações

de conexão já existentes na rede original, aumentando dessa forma o limite do tamanho máximo da rede utilizada em uma aplicação *Smart Grid*.

Também pode-se notar que, ao seguir uma distribuição de probabilidades de interconexão de nós condizente com a realidade a qual a proposta se destina, como a representada na Figura 16, a valência máxima utilizada na geração do grafo não tem grande impacto no percentual de melhoria alcançado através da utilização do BSN. Em contrapartida, fica claro uma diminuição de efetividade da metodologia na melhoria do custo total da rede quando usado em redes com muitos nós. Aqui é importante ressaltar que o custo total, definido conforme o exposto na Seção 3.2.1, é na verdade a soma de todos os custos entre o nó central e todos os destinos da rede. Neste sentido, conclui-se que existem pelo menos dois fatores contribuintes para a diminuição do percentual de melhoria com o aumento do número de nós da rede. O primeiro é inerente ao fato de que espera-se apenas algumas conexões com grandes valores de custo, ou seja, a rede como um todo deve possuir muito mais conexões com baixo custo do que com alto custo, sendo que desta forma a contribuição da otimização destes ramos para o custo total da rede acaba sendo pequena. O segundo fator contribuinte é o de que quanto mais nós existirem em uma rede em malha, maior será a possibilidade de combinações/rotas disponíveis. Desta forma, em uma rede com alto nível de multipercursos espera-se que as rotas ótimas já possuam baixo custo mesmo sem nenhuma alteração de topologia, dessa forma a efetividade da metodologia proposta neste tipo de cenário é menor.

Logo, pode-se concluir que, com relação ao custo total da rede, quanto maior o diâmetro da mesma menor será a efetividade do algoritmo considerando a rede (em topologia em malha) como um todo. Em contrapartida o mesmo princípio não se aplica ao considerar-se o custo individual de cada um dos ramos do grafo, o que em geral representa a maior preocupação deste tipo de aplicação.

Conforme o apresentado na Seção 4.2, quanto maior o número de saltos de um ramo em específico, o que representa o real gargalo da rede em se tratando de SGs, maior será o percentual de melhoria conseguido em seu custo através da utilização do BSN. Fato esperado visto que quanto mais comprido é um ramo do grafo mais efetiva deve ser a utilização do chaveador óptico na alteração da topologia física desta conexão. Dessa forma, além de ótimo resultado na diminuição do custo total da rede, o BSN apresenta um ótimo resultado ao considerar-se ramos longos do grafo, abrindo a oportunidade da utilização do algoritmo para otimização, não apenas da rede como um todo, mas também da comunicação com nós de baixo desempenho devido à profundidade de rede, resolvendo dessa forma o real problema encontrado no cenário descrito.

Como consequência secundária, mas não menos importante, a utilização da metodologia proposta pode permitir que pontos anteriormente fora da SG devido à distância, possam ser incluídos sem a necessidade de construção de um centro de controle de rede secundário. Isso acarreta não apenas em maior abrangência para a distribuidora de energia elétrica como também em grande economia na criação e instalação de infraestrutura.

Por fim, é interessante ressaltar que a função objetivo ou função de *fitness* utilizada nesta implementação teve foco na redução de número de saltos considerando a rede completa como objeto de avaliação, mas a mesma poderia ser alterada para considerar a minimização apenas dos ramos mais compridos, com pior desempenho, maior prioridade ou ainda basear-se na distribuição de carga ou indicadores como o QoS, sendo estas implementações sugeridas para trabalhos futuros.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Com base no apresentado neste documento sugerem-se, como possíveis trabalhos futuros, para a continuação deste estudo a implementação da metodologia apresentada no estudo dos seguintes parâmetros:

- Minimização apenas dos ramos mais compridos do grafo da rede considerado aumentando a largura da rede resultante em comparação com a original.
- Aplicação da metodologia na otimização da comunicação nos ramos de grafo com pior desempenho.
- Aplicar a metodologia proposta na engenharia de tráfego da rede com foco na distribuição de carga da mesma.
- Aplicar a metodologia proposta focando no atendimento de políticas de QoS da rede.

Implementações como estas podem se realizadas, conforme comentado, através da alteração da função de *fitness* do BSN. Entretanto, é necessário ressaltar que em um ambiente real a decisão do nó ou equipamento alvo da otimização depende basicamente do administrador da rede em questão.

## REFERÊNCIAS

- ACCELINK. **OSW-22BUM-135-09-1-N-S-SC/UPC ACCELINK Product Specification**. China, 12 2014.
- Aggarwal, A.; Kunta, S.; Verma, P. K. A proposed communications infrastructure for the smart grid. In: **2010 Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)**. Gothenburg, Sweden: IEEE, 2010. p. 1–5. ISSN 978-1-4244-6333-6.
- Amin, M. Toward self-healing energy infrastructure systems. **IEEE Computer Applications in Power**, v. 14, n. 1, p. 20–28, Jan 2001. ISSN 1558-4151.
- BACK, T.; FOGEL, D. B.; MICHALEWICZ, Z. **Basic Algorithms and Operators**. 1st. ed. GBR: IOP Publishing Ltd., 1999. ISBN 0750306645.
- BROWNLEE, J. **Clever Algorithms: Nature-Inspired Programming Recipes**. 1st. ed. USA: Lulu.com, 2011. ISBN 1446785068.
- COFFEY, J. Latency in optical fiber systems. 2017. Disponível em: <[https://www.commscope.com/Docs/Latency\\_in\\_optical\\_fiber\\_systems\\_WP-111432-EN.pdf](https://www.commscope.com/Docs/Latency_in_optical_fiber_systems_WP-111432-EN.pdf)>.
- DESHPANDE, J.; KIM, E.; THOTTAN, M. Differentiated services qos in smart grid communication networks. **Bell Labs Technical Journal**, 2011.
- DIJKSTRA, E. **A Note on Two Problems in Connexion with Graphs**. p. 269 – 271,,: Numerische Mathematik, 1959.
- EPPSTEIN, D. **Spanning Trees and Spanners**. Irvine, CA, 1996.
- FEOFILOFF PAULO; KOHAYAKAWA, Y. W. Y. **Uma Introdução Sucinta à Teoria dos Grafos**. São Paulo, 2011. Disponível em: <<https://www.ime.usp.br/pf/teoriadosgrafos/>>.
- FOGEL, D. B. **Evolutionary Computation: Toward a New Philosophy of Machine Intelligence**. New Jersey: IEEE Press, 1995. ISBN 0780310381.
- FOGEL, L.; OWENS, A.; WALSH, M. **Artificial intelligence through simulated evolution**. Chichester, WS, UK: Wiley, 1966.
- GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. 1st. ed. Boston, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989. ISBN 0201157675.
- Gungor, V. C. et al. A survey on smart grid potential applications and communication requirements. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 9, n. 1, p. 28–42, Feb 2013. ISSN 1941-0050.
- IEEE COMPUTER SOCIETY. **802.1D IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Media Access Control (MAC) Bridges**. 2004.

KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Computer Networking a Top-Down Approach**. London, England: Pearson, 2013.

Lobo, F. et al. Distribution network as communication system. In: **CIREN Seminar 2008: SmartGrids for Distribution**. Frankfurt, Germany: IET, 2008. p. 1–4. ISSN 0537-9989.

MA, R. et al. Smart grid communication: Its challenges and opportunities. **IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID**, 2013.

PRIM, R. C. Shortest connection networks and some generalizations. **Bell System Technical Journal**, p. 1389–1401, November 1957.

RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K.; SASAKI, G. **Optical Networks: A Practical Perspective, 3rd Edition**. 3rd. ed. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2009. ISBN 0123740924.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence A modern Approach - Third edition**. New Jersey: Prentice Hall, 2018.

Sood, V. K. et al. Developing a communication infrastructure for the smart grid. In: **2009 IEEE Electrical Power Energy Conference (EPEC)**. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2009. p. 1–7. ISSN 978-1-4244-4508-0.

TANENBAUM, A. **Computer Networks**. 4th. ed. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2002. ISBN 0130661023.