

Universidade Federal de Juiz de Fora  
Faculdade de Engenharia  
Departamento de Energia

**Lígia Filgueiras Guedes**

**Planejamento da Transmissão de Energia Elétrica via Otimização  
Bioinspirada**

Juiz de Fora  
2017

Lígia Filgueiras Guedes

**Planejamento da Transmissão de Energia Elétrica via Otimização  
Bioinspirada**

Relatório final apresentado ao Departamento de Energia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Ivo Chaves da Silva Júnior

Juiz de Fora

2017

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Guedes, Lígia Filgueiras.

Planejamento da Transmissão de Energia Elétrica via Otimização Bioinspirada / Lígia Filgueiras Guedes. – 2017.

54 f. : il.

Orientador: Ivo Chaves da Silva Júnior

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Departamento de Energia, 2017.

1. Otimização Bioinspirada. 2. Planejamento da Expansão. 3. Transmissão. I. Júnior, Ivo Chaves da Silva. II. Título.

Lígia Filgueiras Guedes

**Planejamento da Transmissão de Energia Elétrica via Otimização  
Bioinspirada**

Relatório final apresentado ao Departamento de Energia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Ivo Chaves da Silva Júnior - Orientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Professor Dr. Cristiano Gomes Casagrande  
Universidade Federal de Juiz de fora

---

Professor Dr. Luís Henrique Lopes Lima  
Universidade Federal de Juiz Fora

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Ivo, pela paciência e ensinamentos durante esse tempo.

À minha mãe, Tânia, por me ensinar a ser a pessoa que sou hoje, por estar comigo em todos os momentos, pelas inúmeras privações em prol da minha felicidade. Eu não sou nada sem ela.

Ao meu namorado, George, por entender as minhas ausências e estar comigo nos meus dias difíceis. Por acreditar em mim quando nem eu mesma acreditava. Essa vitória também é dele.

À minha família, que é tudo pra mim e que com certeza sem ela eu não estaria aqui hoje. Em especial aos meus avós Geraldo e Dagmar e aos meus tios e primas, Juliana, Sílvio, Jussara, Teotônio, Gerci, Virgínia, Júlia, Laura e Nara.

Aos meus tios-avós, Dinha, Tetê, Ritinha e Reis, por vocês eu acordo todas as manhãs com vontade de ser uma pessoa melhor.

À minha prima e irmã de coração, Luísa, pela convivência durante três anos e pela cumplicidade e momentos divididos.

A todos os meus amigos, aqueles de sempre e os que fiz durante a faculdade. A longa trajetória foi amenizada pelo companheirismo de vocês. Em especial à Raiza e Manu que estiveram comigo no pior momento da minha vida.

A todos os professores que tive ao longo dessa caminhada, inclusive aqueles que dificultaram a mesma, mas principalmente aqueles que acreditaram no meu potencial.

“Não é o mais forte ou mais inteligente que sobrevive, mas sim o que consegue lidar melhor com a mudança.” Charles Darwin

## RESUMO

O presente trabalho vai tratar do planejamento da expansão da transmissão através de otimização bioinspirada. Esse planejamento se refere ao processo de tomadas de decisão através de um operador para resolver se haverá ou não a expansão do sistema elétrico e a melhor maneira que essa expansão deve ser feita. Ao citar esse planejamento, é relevante salientar que seu problema consiste em minimizar os custos de investimentos na construção de reforços e ampliação da rede de energia elétrica, impostos pelo crescimento da demanda e de novas capacidades de geração. Já a otimização utilizada será uma meta-heurística chamada de algoritmo genético. É um algoritmo que alia as técnicas de evolução natural à modelagem computacional. Através da metodologia proposta para a resolução do problema em estudo, vão ser obtidos resultados com quatro sistemas: dois sistemas pequenos, um de três e outro de quatro barras; um proposto por Garver e outro real que representa a região Sul do Brasil.

Palavras-chave: Algoritmo genético. Expansão da Transmissão. Otimização. Planejamento estático.

## ABSTRACT

The present work will deal with the transmission expansion planning through bioinspired optimization. This planning refers to the process of decision-making by an operator to resolve whether or not the expansion of the electrical system and the best way that this expansion should be done. By quoting this plan, it is important to emphasize that its problem is to minimize investment costs in building reinforcements and expansion of the electricity network, taxes on demand growth and new generation capacities. The optimization used will be a metaheuristics called the genetic algorithm. It is an algorithm that combines the techniques of natural evolution to computational modeling. Through the proposed methodology for solving the problem in study, results will be obtained with four systems. Two small systems, one of three bars and one of four bars. And two most common in the problem of transmission planning, one proposed by Garver and another real that represents the southern region of Brazil.

Key-words: Genetic algorithm. Optimization. Static planning. Transmission Expansion Planning.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistema Elétrico de Potência . . . . .	12
Figura 2 – Sistema de Transmissão . . . . .	13
Figura 3 – Modelo Equivalente $\pi$ de uma linha de transmissão. . . . .	23
Figura 4 – Estrutura do AG . . . . .	32
Figura 5 – Exemplo do método de seleção Roleta . . . . .	34
Figura 6 – Sistema de Três Barras . . . . .	37
Figura 7 – Sistema de Três Barras – Resposta AG . . . . .	38
Figura 8 – Sistema de Quatro Barras . . . . .	39
Figura 9 – Sistema de Quatro Barras – Resposta AG . . . . .	39
Figura 10 – Sistema de Garver . . . . .	40
Figura 11 – Sistema de Garver sem Redespacho de Geração – Resposta AG . . . . .	41
Figura 12 – Sistema de Garver com Redespacho de Geração – Resposta AG . . . . .	42
Figura 13 – Sistema Sul Equivalente do Brasil . . . . .	44
Figura 14 – Sistema Sul – Resposta AG . . . . .	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Analogia entre Evolução Natural e Algoritmo Genético . . . . .	31
Tabela 2 – Planejamento da Expansão para o Sistema de Três Barras . . . . .	38
Tabela 3 – Planejamento da Expansão para o Sistema de Quatro Barras . . . . .	39
Tabela 4 – Planejamento da Expansão para o Sistema de Garver sem Redespacho	41
Tabela 5 – Planejamento da Expansão para o Sistema de Garver com Redespacho	42
Tabela 6 – Planejamento da Expansão para o Sistema Sul . . . . .	43
Tabela 7 – Dados de barra e geração – Sistema de Três Barras . . . . .	49
Tabela 8 – Dados dos circuitos existentes – Sistema de Três Barras . . . . .	49
Tabela 9 – Dados dos circuitos candidatos – Sistema de Três Barras . . . . .	49
Tabela 10 – Dados de barra e geração – Sistema de Quatro Barras . . . . .	49
Tabela 11 – Dados dos circuitos existentes – Sistema de Quatro Barras . . . . .	49
Tabela 12 – Dados dos circuitos candidatos – Sistema de Quatro Barras . . . . .	50
Tabela 13 – Dados de barra e geração – Sistema de Garver . . . . .	50
Tabela 14 – Dados dos circuitos existentes – Sistema de Garver . . . . .	50
Tabela 15 – Dados dos circuitos candidatos – Sistema de Garver . . . . .	51
Tabela 16 – Dados de barra e geração – Sistema Sul . . . . .	52
Tabela 17 – Dados dos circuitos existentes – Sistema Sul . . . . .	53
Tabela 18 – Dados dos circuitos candidatos – Sistema Sul . . . . .	54

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PPEST	Problema de Planejamento da Expansão do Sistema de Transmissão
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
GRASP	<i>"Greedy Randomized Adaptive Search Procedure"</i>
AG	Algoritmo Genético
PTS	<i>"Parallel Tabu Search"</i>
OO	<i>"Ordinal Optimization"</i>
PSO	<i>"Particle Swarm Optimization"</i>
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
TEP	<i>"Transmission Expansion Planning"</i>
GEP	<i>"Generation Expansion Planning"</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . .</b>	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>FORMULAÇÃO E MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO E DO PROBLEMA DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANS- MISSÃO . . . . .</b>	<b>20</b>
3.1	MODELAGEM DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO . . . . .	20
3.1.1	Formulação básica do fluxo de carga . . . . .	21
3.1.2	Modelagem de linhas de transmissão . . . . .	22
3.1.3	Fluxos de potência ativa e reativa . . . . .	23
3.1.4	Fluxo de carga linearizado . . . . .	24
3.1.5	Formulação matricial do fluxo de carga linearizado . . . . .	25
3.2	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA . . . . .	26
3.2.1	Formulação Básica . . . . .	26
3.2.1.1	<i>Função Objetivo</i> . . . . .	26
3.2.1.2	<i>Equação de Balanço</i> . . . . .	27
3.2.1.3	<i>Restrições de Rede</i> . . . . .	27
3.2.1.4	<i>Restrições Operativas</i> . . . . .	28
3.2.1.5	<i>Restrições do Parâmetro de Expansão</i> . . . . .	28
3.2.2	Conclusões parciais . . . . .	29
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO . . . . .</b>	<b>30</b>
4.1	HISTÓRICO . . . . .	30
4.2	DEFINIÇÕES BÁSICAS . . . . .	31
4.3	ESTRUTURA DOS ALGORITMOS GENÉTICOS . . . . .	31
4.4	PARÂMETROS GENÉTICOS . . . . .	32
4.4.1	Tamanho da População . . . . .	32
4.4.2	Taxa de Cruzamento . . . . .	32
4.4.3	Taxa de Mutação . . . . .	33
4.4.4	Elitismo . . . . .	33
4.4.5	Convergência . . . . .	33
4.5	FUNÇÃO DE AVALIAÇÃO . . . . .	33
4.6	OPERADORES GENÉTICOS . . . . .	33
4.6.1	Operador de Seleção . . . . .	33
4.6.2	Operador de Cruzamento . . . . .	34

4.6.3	<b>Operador de Mutação</b> . . . . .	35
4.7	<b>CODIFICAÇÃO</b> . . . . .	35
<b>5</b>	<b>RESULTADOS OBTIDOS</b> . . . . .	<b>37</b>
5.1	SISTEMA DE TRÊS BARRAS . . . . .	37
5.2	SISTEMA DE QUATRO BARRAS . . . . .	38
5.3	SISTEMA DE GARVER . . . . .	40
5.4	SISTEMA SUL . . . . .	43
<b>6</b>	<b>PRINCIPAIS CONCLUSÕES DO TRABALHO</b> . . . . .	<b>45</b>
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .	45
6.2	TRABALHOS FUTUROS . . . . .	45
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>46</b>
	<b>APÊNDICE A – Dados dos Sistemas de Transmissão</b> . . . . .	<b>49</b>
A.1	SISTEMA DE TRÊS BARRAS . . . . .	49
A.2	SISTEMA DE QUATRO BARRAS . . . . .	49
A.3	SISTEMA DE GARVER . . . . .	50
A.4	SISTEMA SUL . . . . .	51

## 1 INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é constituído de três elementos fundamentais: distribuição, geração e transmissão. A distribuição é responsável por reduzir a tensão para níveis mais seguros. A geração refere-se à aquisição e conversão de energia através de fontes primárias. E a transmissão é um método através do qual a energia é transmitida ao longo de linhas. Por meio da Figura 1, pode-se melhor visualizar o funcionamento do SEP.

No presente trabalho, o foco é a transmissão. A sua Rede Básica, devido à grande extensão territorial e à presença de um parque gerador constituído em sua maior parte por hidrelétricas, se expandiu adotando diferentes níveis de tensão em razão das amplas distâncias entre as fontes geradoras e os centros de carga. Ela compreende as tensões de 230 kV a 750 kV, tendo como funções elementares a transmissão de energia das usinas para os centros de carga, a incorporação entre os diversos componentes do sistema elétrico assegurando estabilidade e confiabilidade da mesma, a integração energética com os países próximos e associação entre as bacias hidrográficas e regiões com propriedades hidrológicas distintas [1].

A transmissão no Brasil é feita pelo Sistema Interligado Nacional (SIN). O mesmo é composto por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e grande parte da região Norte. A interligação dos sistemas elétricos assegura o transporte de energia entre subsistemas, propicia ganhos mútuos entre eles e aproveita a diversidade hidrológica entre as dezesseis bacias existentes. A interconexão entre geração e transmissão garante

Figura 1 – Sistema Elétrico de Potência

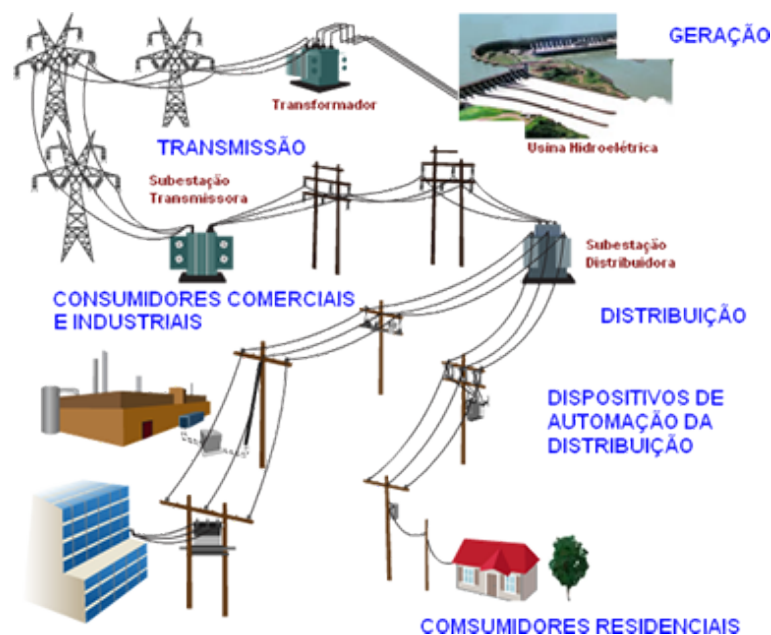
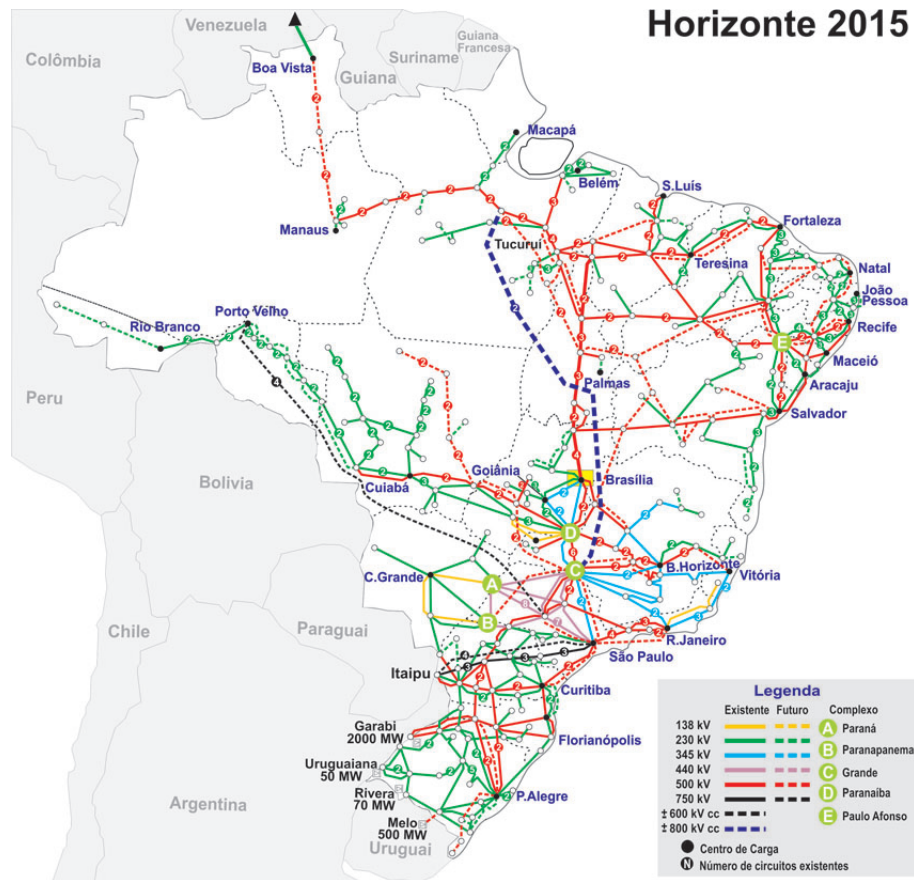


Figura 2 – Sistema de Transmissão



Fonte: ONS

um sistema mais econômico e confiável [2]. Na Figura 2, pode-se ver o mapa do sistema de transmissão brasileiro no horizonte de 2015.

Para que haja garantia do funcionamento correto do sistema de transmissão, a fim de garantir o abastecimento de energia aos consumidores, é feito o Planejamento da Expansão da Transmissão. Ele diz respeito ao processo de tomadas de decisão através de um operador para solucionar se deve haver ou não a expansão do sistema elétrico e a melhor maneira que a mesma deve ser feita. Ao citar esse planejamento, é imprescindível destacar que seu problema consiste em minimizar os custos de investimentos na construção de reforços e ampliação da rede de energia elétrica, impostos pelo crescimento da demanda e de novas capacidades de geração [3].

Além do presente capítulo, o trabalho é composto de mais cinco. No capítulo 2, encontra-se a revisão bibliográfica. O capítulo 3 é formado pela formulação e modelagem do sistema elétrico e do problema da expansão de sistemas de transmissão. No capítulo 4, tem-se a metodologia de resolução através de algoritmo genético. Já os capítulos 5 e 6 são compostos pelos resultados obtidos e pela conclusão.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em 1970, foram publicados os primeiros estudos sobre o planejamento da expansão da transmissão. Refere-se a um trabalho de Garver [4] que foi considerado uma proposição essencial na pesquisa do tema pois era a única maneira de otimizar o problema com as ferramentas acessíveis naquela época. O fluxo de potência foi modelado através da aplicação de um algoritmo de programação linear. Essa programação elucidou as rotas candidatas e comprovou a rede pelo modelo de transportes. Modelo esse que é considerado relaxado pois engloba somente a primeira lei de Kirchhoff e, diferentemente dos utilizados no estudo de operação, foi denominado modelo de síntese de sistemas de transmissão. A modelagem de transporte, bem como todas as de síntese, realiza somente o planejamento levando em conta o fluxo de potência ativa estabelecendo somente o problema de capacidade de transmissão [5, 6].

Em [7], foi utilizado um algoritmo heurístico baseado no modelo de fluxo de potência CC. A posição para novas adições é baseada no critério do "Mínimo Esforço" que leva em conta o modelo de distribuição de fluxo na rede. Uma rede automática analisa o algoritmo que pode ser empregado para estudos estáticos. Esse planejamento estático nos mostra quais são as linhas que devem ser construídas. O critério de reforço é fundamentado na análise custo/benefício dos caminhos de "Mínimo Esforço" na rede. Barras desconectadas são convenientemente suportadas pela superposição dos modelos de rede com capacidade baixa de transmissão pela linha atual. A análise de sensibilidade é fortemente utilizada. O modelo CC ou linear é um pouco mais complexo que o de transportes, pois seu planejamento considera a potência ativa e o ângulo de potência.

Em 1985, Villasana *et al* [8] divulgou o modelo não linear. Esse novo método combina o modelo CC com o modelo de transporte e é mais complexo em relação aos anteriores, pois nele é considerada potência ativa e reativa, assim como tensão e ângulo de potência. No planejamento da transmissão a longo alcance, onde há aumento de novas cargas, novos locais de geração e talvez um novo nível de voltagem deve ser considerado, um computador auxiliado por um método de visualização de novos circuitos na rede é necessário.

A solução da programação linear para os dois modelos juntos identifica onde capacidades escassas existem, onde adicionar novos circuitos e quanto de capacidade nova é necessária. Um pacote de programação linear padrão é usado para resolver a formulação de ambos modelos. O modelo de sobrecarga da rede é somente uma assistência matemática na seleção de novas linhas e é completamente inútil quando o modelo da rede é composto e não contém sobrecargas [8].

Ainda no mesmo ano, em [9], utilizou-se a análise de sensibilidade como uma ferramenta para o planejamento da expansão da transmissão. Nesse método, possíveis



investimentos foram posicionados de acordo com a eficiência no aumento da capacidade de suprimento de carga no sistema ou redução do corte da mesma. O cálculo desses índices foi feito através de um caso especial do problema de despacho ótimo, onde eficientes soluções foram encontradas. O algoritmo utilizado foi um heurístico construtivo chamado de "Mínimo Corte de Carga".

Já em 1995, Romero *et al* [10] fez uso de um algoritmo meta-heurístico. Tratou-se de um estudo de Recozimento Simulado ("*Simulated Annealing*") para a análise do planejamento da expansão da transmissão a longo prazo. Era um problema de difícil combinação e de grande escala. Foram realizados testes em três sistemas diferentes, dos quais dois eram pequenos com conhecidas soluções ótimas que tiveram utilização na combinação de parâmetros do processo de Recozimento Simulado. O método foi também aplicado em um sistema maior, onde não ocorreram soluções ótimas. Logo depois, em Gallego *et al* [11] utilizou-se a técnica de otimização do Recozimento Simulado Paralelo onde uma estratégia que não afeta as propriedades de convergência básica do método foi implementada e testada. O artigo de Gallego *et al* investigou as condições onde esse algoritmo é mais eficiente e mostrou melhoras na qualidade para maiores redes testadas.

Um algoritmo de Recozimento Simulado Híbrido foi apresentado em [12] para resolver o problema estático do planejamento da expansão da transmissão. O programa englobou uma busca local que percorre cada temperatura. A busca local é uma heurística de busca de baixo custo que refina a solução encontrada em cada nível de temperatura. Ela também permite diminuir o tempo de processamento. O método permitiu encontrar soluções de elevada qualidade em um tempo menor do que o Recozimento Simulado padrão.

O estudo de [13] apresentou uma comparação de meta-heurísticas para resolver o nosso problema. A metodologia proposta incluiu a busca pela solução de menor custo levando em conta investimentos e custos de operação relacionados a perdas ôhmicas de transmissão. Através de um padrão medidor de qualidade das sequências superiores descobertas, foi qualificada a performance das meta-heurísticas. Casos estudados em um sistema pequeno e em um real foram apresentados e discutidos.

Outra meta-heurística utilizada para o problema de planejamento da expansão da transmissão em [14] é a Busca Tabu ("*Tabu Search*"). É um processo adaptativo empregado para solucionar obstáculos de otimização o qual modifica o comportamento da busca local de heurísticas. Além do conhecimento adquirido durante a exploração do espaço de soluções, a técnica possibilita que os lugares que foram visitados recentemente disponham de um efeito atrativo para a trajetória de busca, garantindo uma exploração mais inteligente em comparação com outros métodos de busca. Vale destacar que em [14] a Busca Tabu é aliada com outras heurísticas como o GRASP ("*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*") correspondendo este ao emprego da busca de soluções iniciais. Esse método de busca também é aplicado em [15].

Ainda em relação à Busca Tabu, temos o trabalho de [16] em que foi proposto o algoritmo de Busca Tabu Paralelo. O mesmo mostrou ser eficaz na exploração do problema em estudo, sendo um procedimento de Busca Tabu de terceira geração com vários recursos avançados. O método inclui particularidades de uma diversidade de outras abordagens, tais como Algoritmo Genético, Busca Heurística e Recozimento Simulado. Em todos os estudos de caso, existem novos locais de geração de carga que podem ser conectados a uma rede principal já existente, tornando o problema mais difícil em termos de combinações. Em [17], foi proposto um método meta-heurístico híbrido de "*Parallel Tabu Search*" (PTS) e "*Ordinal Optimization*" (OO). O artigo determinou uma estrutura ótima que garantia o balanço entre carga e geração. A formulação foi apresentada como um problema de otimização combinatória que é bem difícil de ser resolvido e onde o PTS pode ser empregado. Para melhoria do esforço computacional do PTS, foi utilizado o segundo método, que reduziu o número de soluções candidatas.

Em 2012, Dewani *et al* [18] estudou o problema através da abordagem de diversas ferramentas, como Programação linear, Otimização dinâmica discreta, Programação linear inteira mista, "*Branch and bound*" e decomposição de "*Benders*", além de métodos heurísticos e meta-heurísticas tais como Algoritmo heurístico construtivo, Busca Tabu, "*Expert system*", Algoritmo Genético, Colônia de Formigas e Enxame de Partículas.

Torres e Castro [19], no mesmo ano, propôs uma implementação paralela da variante local de um método chamado "*Particle Swarm Optimization*" (PSO), do português Enxame de Partículas, usando um modelo CC. Foram empregados os sistemas de Garver e o IEEE 24-barras para apresentação de resultados.

Apresentou-se em [20] o problema do planejamento da expansão de um sistema prático multizona usando Algoritmo Genético (AG). O objetivo dessa expansão para o sistema em estudo foi encontrar as rotas, tipos de condutores e níveis de tensão do novo conjunto de linhas de transmissão que produzem o menor custo enquanto satisfazem a previsão de demanda de carga. O custo foi considerado como uma função objetivo para o método. Utilizou-se o mesmo método em [21]. Neste artigo, um AG especializado foi apresentado para resolver o problema de TEP estático e multiestágio. Uma das melhores contribuições do Algoritmo Genético é o progresso local de um indivíduo. A fim de aperfeiçoar o presente estudo, fez-se uso do Algoritmo Heurístico Construtivo para melhorar a inviabilidade de um descendente criado. O mesmo realizou isso adicionando linhas aos indivíduos e eliminando as desnecessárias, ou seja, as que apresentaram derramamento de carga.

Em [22], aplicou-se outra técnica. Este artigo apresentou aplicações de busca de população baseado em um algoritmo chamado "*Artificial Bee Colony*" (ABC) que utiliza o modelo de fluxo de potência CC. É um algoritmo meta-heurístico baseado no comportamento inteligente do enxame de abelhas. A viabilidade da solução do problema

refere-se à posição da fonte de comida. A habilidade do método em estudo foi testada em três redes conhecidas e os resultados obtidos foram comparados com literaturas publicadas anteriormente. Além disso, os mesmos foram considerados satisfatórios.

O artigo [23] propõe um algoritmo aprimorado chamado "*Harmony Search*" (HS) ou harmônica de busca recursiva para a solução do TEP em ambiente desregulado considerando restrições de segurança. O método foi modificado em relação ao HS tradicional e acrescentou a introdução de uma largura de banda variável na consideração de memória e as fases de ajuste de afinação no passo de improvisação do algoritmo, além da oportunidade de reiniciar o algoritmo após o número máximo de improvisações, que é alcançado mantendo as melhores soluções da execução do algoritmo anterior. Dessa forma, a probabilidade de encontrar a solução ótima do problema em estudo é extremamente ampliada sem onerar o tempo de computação do algoritmo. O algoritmo proposto foi experimentado e avaliado no sistema de Garver. Ademais, foi introduzida uma nova formulação de custo-benefício do planejamento da expansão da transmissão que foi resolvida pelo algoritmo HS proposto.

Existem vários problemas de otimização matemática que podem ser efetivamente resolvidos por algoritmos meta-heurísticos. A vantagem destes algoritmos é que eles executam processos de pesquisa iterativos que executam eficientemente a exploração no espaço de domínio contendo solução ótima local e global. É o caso de [24], onde três tipos de algoritmos foram utilizados para encontrar soluções ideais. "*Firefly*" é inspirado pelo comportamento dos vaga-lumes. O "*Bat Algorithm*" baseia-se no comportamento de ecolocalização dos morcegos e "*Cuckoo Search*" é um padrão corresponde a um ninho e similarmente cada atributo individual do padrão corresponde a um ovo de cuco. Uma série de experimentos computacionais usando cada algoritmo foram conduzidos. Os resultados experimentais foram analisados e observou-se que o algoritmo do vaga-lume parece ter um desempenho melhor do que os outros dois.

Em [25], foi descrito um novo modelo probabilístico para o planejamento da expansão da geração e transmissão, considerando os critérios de confiabilidade. O modelo resultante considerou os custos de instalação e operação, bem como o custo de energia esperada não fornecida para determinar o número e localização de novas unidades geradoras e circuitos na rede, a capacidade de geração de energia dessas unidades e o ângulo de fase de tensão em cada nó. Além disso, formulações lineares eficientes foram introduzidas neste trabalho para lidar com a natureza não linear do problema, incluindo funções e restrições objetivas.

As energias renováveis têm tido acentuado aumento nos últimos anos, gerando desafios para o planejador de expansão da transmissão. Há uma exigência de uma melhoria no planejamento da expansão da transmissão para que esse problema seja solucionado. Dessa maneira, em [26] o impacto da elevada introdução da energia eólica no problema do TEP foi levado em conta. O parque eólico foi tido como uma fonte alternativa para o

suprimento da carga nas redes de transmissão. O complicado modelo de custo de energia eólica é integrado com o tradicional problema de planejamento da expansão da rede de transmissão. O problema em estudo foi modelado usando o modelo de fluxo de energia CC. A função objetivo principal é minimizar o custo total do sistema, que consiste em custo de investimento de linha de transmissão, custo de combustível de geradores e custo de energia eólica. A resolução deste problema de otimização não linear e não convexo foi feita com um novo algoritmo de otimização. Ele é uma modificação do algoritmo Gás Browniano em Movimento. Foram testados três sistemas para avaliação da capacidade do problema.

No ano de 2015, em [27], para solucionar o problema de planejamento da expansão da transmissão foi utilizado uma tendência importante recentemente em que se emprega o modelo de rede de corrente alternada (CA). Este problema é intensamente árduo de solucionar devido à sua natureza combinatória e ao comportamento não linear apresentado utilizando o modelo de rede CA. Foi apresentada uma aplicação especializada melhorada de Evolução Diferencial para resolver o problema TEP em sua forma estática, utilizando o modelo CA e levando em consideração a compensação da potência reativa. Algumas comparações foram realizadas usando algumas outras meta-heurísticas baseadas em enxames, a fim de demonstrar os bons resultados obtidos.

No mesmo ano, em [28], apresentou-se uma nova abordagem dinâmica sobre o problema em estudo. Primeiramente, foi desenvolvido um programa não linear inteiro misto para a coordenação da expansão entre a transmissão e a geração. Em seguida, foi mostrado que este modelo de programação não pode ser solucionado de maneira eficaz pelos solucionadores tradicionais. Dado que o termo não linear origina-se da multiplicação de uma variável binária por uma contínua, uma abordagem de decomposição de Benders foi aplicada. Ademais, diferentes tempos de construção foram ponderados para distintas instalações de transmissão e geração, e um algoritmo fundamentado em *cluster* foi proposto para qualificar a confiabilidade do sistema.

No artigo [29], foi efetuada uma coordenação entre o planejamento de expansão de geração (GEP) e o planejamento de expansão de transmissão em mercado competitivo de eletricidade. No método proposto, GEP e TEP foram realizados ao mesmo tempo, considerando a incerteza do parque eólico. A incerteza foi modelada pela função de distribuição de probabilidade normal e a simulação de Monte-Carlo foi usada para incluir a incerteza no problema. O planejamento proposto visava a maximizar o lucro esperado de todas as empresas de geração e transmissão, considerando simultaneamente restrições de segurança e confiabilidade, como margem de reserva e perda de expectativa de carga. O problema proposto é uma programação de otimização de número inteiro, não linear e mista, resolvida pelo método de otimização de enxame de partículas.

Em [30], vemos que o crescimento dos programas de resposta à demanda e de geração de fontes renováveis está mudando a economia da transmissão. Planejadores e re-

guladoras requerem ferramentas para abordar a implicação de um possível desenvolvimento tecnológico, político e econômico para a configuração ótima das redes de transmissão. Foi proposto um modelo para avaliação econômica e otimização da expansão da transmissão inter-regional, bem como a resposta ótima dos investimentos dos geradores para incentivos locais, que explica as leis de Kirchhoff e três importantes não linearidades. A primeira é a resposta do consumidor aos preços de energia, modelado usando funções de demanda elástica. A segunda são as perdas resistivas. E a terceira é produto da susceptância da linha e fluxos no modelo de fluxo de carga linearizado CC. Foi desenvolvido um método prático que combina a Programação Sucessiva Linear com iteração de Gauss-Seidel. Os exemplos indicam que a resposta à demanda pode ser um recurso valioso que pode afetar significativamente a economia, localização e quantidades de investimentos de transmissão e geração. Além disso, representar perdas e leis de Kirchhoff também é importante nas análises de políticas de transmissão.

Neste capítulo, foram apontados vários métodos encontrados em diversas bibliografias. O problema do planejamento da expansão da transmissão teve seu primeiro artigo escrito em 1970, em que foram utilizadas as ferramentas disponíveis na época. Com o passar do tempo, vieram as heurísticas e meta-heurísticas que fizeram ser possível a programação para sistemas cada vez mais reais. Até hoje estes estudos são feitos e a tendência é que a programação e otimização se tornem cada vez melhores.

O capítulo seguinte vai abordar, em maiores detalhes, a formulação e modelagem do sistema elétrico e do problema da expansão de sistemas de transmissão. Através de um planejamento estático, será utilizado a modelagem do sistema do tipo linear e uma formulação que leva em conta informações conhecidas e que serão discutidas no próximo capítulo.

### 3 FORMULAÇÃO E MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO E DO PROBLEMA DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

O planejamento da expansão do sistema de transmissão divide-se em duas análises, podendo ser estático ou dinâmico. O planejamento estático leva em conta quais as linhas devem ser construídas, já o dinâmico considera quando as novas linhas devem entrar em operação. No presente trabalho, será tratado somente o planejamento estático.

Como foi dito anteriormente, estamos tratando do planejamento estático da expansão. O problema do presente trabalho é de programação não linear inteira mista, contendo variáveis discretas e contínuas. O mesmo é de difícil solução, podendo-se destacar inúmeras peculiaridades. A região é de solução não convexa (multimodal), onde existem diversas soluções e as condições iniciais inclinam-se a intervir na qualidade da resposta, fazendo com que a convergência se dê em direção a uma solução ótima local. Há também uma explosão combinatória que diz respeito às diversas possibilidades de investimento, ocasionando excessivo esforço computacional. E, por fim, pode-se citar a presença de sistemas não conexos. Todos esses fatores mostram as adversidades na utilização de algoritmos eficazes na elucidação do problema [6, 31].

#### 3.1 MODELAGEM DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

Existem três tipos de modelos mais conhecidos na literatura. Eles são classificados quanto a sua complexidade. O mais simples é o modelo de transportes, seguido do modelo linear. O mais complexo é o modelo não linear, que é um híbrido dos anteriores.

Em 1970, criou-se o primeiro modelo de resolução, que foi apresentado por Garver. O modelo de transportes, também denominado como modelo de síntese, faz uso da programação linear inteira mista e emprega a lei das correntes de Kirchhoff. Segundo essa lei, a soma das correntes que entram nos nós é igual a soma das correntes que saem dos nós; ou seja, o mesmo fluxo de potência que entra na barra também sai da barra. Já a segunda lei de Kirchhoff, ou lei das tensões, não é considerada neste modelo e apresenta-se um esforço em facilitar a análise da rede, gerando respostas possíveis com o menor número de circuitos por caminhos. Como dito anteriormente, ele leva em conta somente a potência ativa, solucionando apenas o problema da capacidade de transmissão [3].

Escolhendo-se esse método, não existe desigualdade em solucionar problemas de sistemas conexos ou ilhados, pois o mesmo não apresenta referência angular, ou seja o ângulo de fase das barras não é considerado como variável de decisão. Ao compará-lo com o modelo não linear ou CA, pode-se visualizar respostas menos interessantes para problemas reais, tornando seu uso desfavorável. Já com referência ao modelo CC ou linear, o modelo de transportes é uma versão relaxada; ou seja, mais fácil de calcular e mais simples.

Em relação ao modelo não linear ou modelo CA, podemos dizer que seu uso seria ideal para apontar a operação apropriada de um sistema. Porém existem algumas razões para não se utilizar essa modelagem. Como o sistema em estudo é ilhado, tem-se dificuldade em resolver problemas desse tipo com fluxo de potência CA e o conhecimento em otimização atualmente sabido para o nosso problema. Além disso, o PPEST estabelece apenas o abastecimento de potência ativa no sistema, o problema de abastecimento de potência reativa se determina subsequentemente.

O modelo CC ou modelo linearizado é o utilizado no nosso problema e grande parte dos processos de resolução são apresentados para resolvê-lo. O fluxo de potência linearizado é baseado no acoplamento entre potência ativa e o ângulo teta. Ele proporciona o desenvolvimento de um modelo aproximado que concede avaliar a distribuição dos fluxos de potência ativa em linhas de transmissão. A vantagem da escolha do fluxo linear é a precisão considerável e o baixo esforço computacional.

Nesse modelo, os circuitos existentes e os a serem construídos dependem das duas leis de Kirchhoff. Esta modelagem apresenta variáveis contínuas que correspondem à diferença angular entre barras e níveis de geração e a fluxos nos circuitos; apresenta também variáveis inteiras, onde se adiciona ou não o circuito (0 ou 1), logo temos um problema de programação não linear inteiro misto, sendo este altamente complexo e com soluções de ótima qualidade [3].

### 3.1.1 Formulação básica do fluxo de carga

O cálculo do fluxo de potência ou de carga em uma rede de energia elétrica fundamenta-se basicamente em definir o estado da rede, distribuição de fluxos e outras grandezas que possam ser interessantes. A modelagem é estática no problema em estudo, pois a rede é formada por um conjunto de equações e inequações algébricas. Elas são não-lineares e dizem a respeito às leis de Kirchhoff e a um conjunto de restrições operacionais da rede elétrica e de seus componentes. Na formulação básica, a cada barra da rede são agregadas quatro variáveis, onde duas são consideradas incógnitas e as outras duas são dados [32]:

- $V_k$  – magnitude da tensão nodal da barra k;
- $\theta_k$  – ângulo da tensão nodal;
- $P_k$  – geração líquida (geração menos carga) de potência ativa;
- $Q_k$  – injeção líquida de potência reativa.

O problema do fluxo de potência é configurado por duas equações para cada barra, onde, através da Primeira Lei de Kirchhoff, cada uma delas retrata as potências ativas e reativas, sendo iguais ao somatório dos fluxos equivalentes que saem da barra.

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (3.1)$$

$$Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (3.2)$$

em que:

- $k=1,..$  NB; sendo NB o número de barras da rede
- $\Omega_k$  – conjunto das barras vizinhas da barra  $k$
- $V_k, V_m$  – magnitudes das tensões das barras terminais do ramo  $k$ - $m$
- $\theta_k, \theta_m$  – ângulos das tensões das barras terminais do ramo  $k$ - $m$
- $P_{km}$  – fluxo de potência ativa no ramo  $k$ - $m$
- $Q_{km}$  – fluxo de potência reativa no ramo  $k$ - $m$
- $Q_k^{sh}$  – componente da injeção de potência reativa devida ao elemento *shunt* da barra  $k$ .

### 3.1.2 Modelagem de linhas de transmissão

A Figura 3 nos mostra o modelo equivalente  $\pi$  de uma linha de transmissão, que é estabelecido por três variáveis: a resistência série  $r_{km}$ , a reatância série  $x_{km}$  e a susceptância *shunt*  $b_{km}^{sh}$ . A impedância e admitância série são mostradas a seguir, respectivamente:

$$z_{km} = r_{km} + jx_{km} \quad (3.3)$$

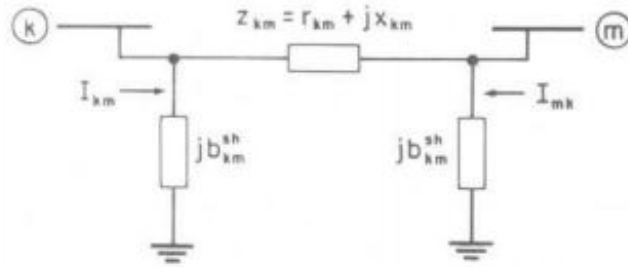
$$y_{km} = g_{km} + jb_{km} = z_{km}^{-1} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} - j \frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (3.4)$$

onde:

- $b_{km}$  – susceptância série;
- $g_{km}$  – condutância série.



Figura 3 – Modelo Equivalente  $\pi$  de uma linha de transmissão.



Fonte: Monticelli, 1983 [32].

Uma linha de transmissão caracterizada pelo modelo  $\pi$  tem reatância e resistência série positivos, fazendo com que a condutância série também seja positiva, mas a susceptância é negativa (tipo indutivo). E como o *shunt* é capacitivo, a susceptância *shunt* é positiva.

Pode ser calculado então a corrente  $I_{km}$ , mostrada na Figura 3, a partir das tensões terminais  $E_k$  e  $E_m$  e também dos parâmetros do modelo em questão:

$$I_{km} = y_{km}(E_k - E_m) + j b_{km}^{sh}(E_k) \quad (3.5)$$

em que:

$$E_k = V_k e^{j\theta_k}; E_m = V_m e^{j\theta_m} \quad (3.6)$$

### 3.1.3 Fluxos de potência ativa e reativa

A partir dos cálculos de corrente e tensão para uma linha de transmissão, realizados na seção anterior, calculam-se os fluxos de potência  $P_{km}$  e  $Q_{km}$ . Primeiramente, determina-se o fluxo de potência complexo e em seguida separa-se a parte real da imaginária para descobrir cada fluxo:

$$S_{km}^* = P_{km} - jQ_{km} = E_k^* I_{km} = y_{km} V_k e^{-j\theta_k} (V_k e^{j\theta_k} - V_m e^{j\theta_m}) + j b_{km}^{sh} V_k^2 \quad (3.7)$$

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos\theta_{km} - V_k V_m b_{km} \sin\theta_{km} \quad (3.8)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m b_{km} \cos\theta_{km} - V_k V_m g_{km} \sin\theta_{km} \quad (3.9)$$

De maneira análoga, obtêm-se os fluxos  $P_{mk}$  e  $Q_{mk}$  :

$$P_{mk} = V_m^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} + V_k V_m b_{km} \sen \theta_{km} \quad (3.10)$$

$$Q_{mk} = -V_m^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m b_{km} \cos \theta_{km} + V_k V_m g_{km} \sen \theta_{km} \quad (3.11)$$

E finalmente, calculam-se as perdas de potência ativa e reativa na linha de transmissão, respectivamente:

$$P_{km} + P_{mk} = g_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (3.12)$$

$$Q_{km} + Q_{mk} = b_{km}^{sh} (V_k^2 + V_m^2) - b_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (3.13)$$

### 3.1.4 Fluxo de carga linearizado

Como já foi dito, o cálculo do fluxo de potência linear só leva em conta a potência ativa e o ângulo. Então, a partir de agora, desconsideramos a potência reativa e a Figura 3 pode ser simplificada desconsiderando as susceptâncias *shunt*.

Para a linearização, algumas hipóteses simplificadoras são necessárias. A primeira delas é que as perdas ativas são nulas, ou seja, o somatório de  $P_{km}$  com  $P_{mk}$  é nulo.

$$P_{km} = -P_{mk} = -V_k V_m b_{km} \sen \theta_{km} \quad (3.14)$$

Utilizam-se mais três aproximações que podem ser vistas a seguir:

- $V_k \cong V_m \cong 1$  pu
- $\sen \theta_{km} \cong \theta_{km}$
- $b_{km} \cong \frac{-1}{x_{km}}$

Então, o equacionamento linear para o fluxo de potência ativa é dado por:

$$P_{km} = x_{km}^{-1} \theta_{km} = \frac{\theta_k - \theta_m}{x_{km}} \quad (3.15)$$

$$P_{mk} = -x_{km}^{-1} \theta_{km} = \frac{\theta_m - \theta_k}{x_{km}} \quad (3.16)$$

### 3.1.5 Formulação matricial do fluxo de carga linearizado

A equação encontrada para o fluxo de potência ativa é uma analogia à lei de Ohm, podendo então ser representado pela equação matricial  $\underline{I} = Y\underline{E}$ . A soma dos fluxos que deixa a barra é a injeção de potência ativa na barra k:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} x_{km}^{-1} \theta_{km} = \left( \sum_{m \in \Omega_k} x_{km}^{-1} \right) \theta_k + \sum_{m \in \Omega_k} (-x_{km}^{-1} \theta_m) \quad (3.17)$$

Essa injeção assume a seguinte representação matricial:

$$\underline{P} = B' \underline{\theta} \quad (3.18)$$

em que:

- $\underline{\theta}$  – vetor dos ângulos das tensões nodais
- $\underline{P}$  – vetor das injeções líquidas de potência ativa
- $B'$  – matriz tipo admitância nodal e cujos elementos são:

$$B'_{km} = -x_{km}^{-1}; B'_{kk} = \sum_{m \in \Omega_k} x_{km}^{-1} \quad (3.19)$$

A injeção de potência, seja qual for a barra, atinge-se com base na soma algébrica das outras, pois as perdas de transmissão foram desconsideradas, e conseqüentemente a soma dos elementos de  $\underline{P}$  é zero. Devido a isso, a matriz  $B'$  é singular, ou seja, é uma matriz quadrada que não possui inversa. Como a singularidade da matriz impossibilita a resolução do problema, retira-se uma das equações do sistema e arbitra-se a barra correspondente como referência angular, ou seja,  $\theta_k = 0$ . Esta operação faz com que a matriz deixe de ser singular e passe a ter dimensão  $NB - 1$ . Vale destacar que qualquer barra pode ser adotada como referência angular. Através da suposição que a rede é conexa, define-se os ângulos das  $NB - 1$  barras com base nas injeções de potência estabelecidas nessas barras [32]. Então, a resolução do sistema de equações será:

$$[\theta] = [B^{-1}] \cdot [P] \quad (3.20)$$

onde:

- B – Matriz de Admitância Nodal, com lei de formação baseada na construção da matriz  $Y_{barra}$  como pode ser visto a seguir:

$$Y_{barra} = \begin{cases} Y_{barra}(i, i) & = + \sum_{j \in \Omega_i} y(i, j) \\ Y_{barra}(i, j) & = - \sum_{j \in \Omega_i} y(i, j) \end{cases} \quad (3.21)$$

Finalmente, para implementação computacional do problema temos a leitura dos dados, a montagem da matriz  $Y_{barra}$ , o tratamento da barra de referência e a resolução do sistema de equações. A leitura dos dados consiste nos dados de entrada, que são os dados de barra formados pela potência ativa e os dados de rede pela reatância das linhas de transmissão. Em posse desses valores, o ângulo  $\theta$  se torna a incógnita, ou seja, o valor que deve ser descoberto.

## 3.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O planejamento da expansão da transmissão é utilizado para descobrir as melhores alternativas de expansão, a partir de informações conhecidas:

- Rotas candidatas à expansão (conexão entre duas barras);
- Número de expansão por rotas candidatas (linhas construídas);
- Custo de construção de cada linha.

O objetivo do problema é minimizar o custo de investimento e garantir atendimento ao mercado, tendo como principais dificuldades suas barras isoladas, natureza combinatória, ser um problema de otimização não linear inteira mista e ter uma região de solução não convexa.

### 3.2.1 Formulação Básica

#### 3.2.1.1 Função Objetivo

A função objetivo é a expressão matemática do critério de otimização representada em relação às variáveis de decisão do problema. No problema em questão, a mesma é modelada pela seguinte equação:

$$Min \sum_{k=1}^{nc} c_k \cdot PE_k + \sum_{m=1}^{nr} c_m \cdot r_m \quad (3.22)$$

onde:

- $nc$  – número de linhas candidatas;
- $c_k$  – custo de construção da linha de transmissão [US\$/ano];

- $PE_k$  – decisão de construção (sim-não);
- $nr$  – número *déficit* de geradores;
- $c_m$  – custo do *déficit* de energia [US\$/MW-ano];
- $r_m$  – valor de geração do *déficit* [MW].

O número *déficit* de geradores é o número de geradores fictícios. Os geradores fictícios são inseridos em cada barra de carga do sistema e, se porventura as expansões efetuadas não assegurem o atendimento à demanda, esses geradores iniciam a operação atestando esse atendimento, mas com custos altos. Através do acréscimo desta parcela na função temos um problema que sempre será resolvido, porém não será necessariamente viável economicamente [6].

### 3.2.1.2 Equação de Balanço

As equações de balanço são as restrições de igualdade, equações estas que fazem parte do próprio modelo matemático. No presente estudo, as mesmas são representadas pela soma da geração da barra e geração *déficit* da barra ou geração fictícia de potência ativa, de alto custo operacional, e a diferença entre os fluxos das linhas. Esse resultado é a demanda a ser atendida.

$$g_i + r_i - \sum_{j \in \Omega_i} f_{ij} = d_i \quad (3.23)$$

em que:

- $g_i$  – geração da barra i [MW];
- $r_i$  – geração *déficit* da barra i [MW];
- $f_{ij}$  – fluxos das linhas de transmissão pertencentes à barra i [MW];
- $d_i$  – mercado a ser atendido na barra i, demanda [MW].

### 3.2.1.3 Restrições de Rede

As restrições de rede são restrições de canalização, que são os limites impostos às variáveis de decisão. São restrições de fluxo de potência ativa e mostram os limites de fluxo dessa potência, nos circuitos existentes e candidatos, representando a capacidade de transporte de fluxo das linhas de transmissão.

$$|f_{ij}| \leq \bar{f}_{ij} \quad \forall (i, j) \in E, C \quad (3.24)$$

em que:

- $f_{ij}$  – fluxo entre as barras i-j [MW];
- $\bar{f}_{ij}$  – limite máximo do fluxo entre as barras i-j [MW];
- $E$  – circuitos existentes;
- $C$  – circuitos candidatos.

#### 3.2.1.4 Restrições Operativas

As restrições operativas também são consideradas restrições de canalização. Elas são limites inferiores e superiores, dos geradores existentes e artificiais. Os fictícios tratam-se de cortes de carga ocasionais, ou seja, geradores de *déficit* [6].

$$\underline{v} \leq v \leq \bar{v} \quad (3.25)$$

onde:

- $\underline{v}$  – limites mínimos;
- $\bar{v}$  – limites máximos;
- $v$  – geração, *déficit*, ângulo de potência, entre outros.

#### 3.2.1.5 Restrições do Parâmetro de Expansão

A definição da construção ou não dos circuitos candidatos é realizada pelo parâmetro de expansão. Quando o parâmetro for zero, sugere a não construção do circuito e se for unitário ou mais um revela a construção de um ou mais circuitos. Assim sendo, este parâmetro equipara-se a uma variável discreta no problema em estudo [6].

$$0 \leq PE_{ij} \leq n \quad \forall (i, j) \in C \quad (3.26)$$

onde:

- $n$  – número de expansões por rota candidata.

### 3.2.2 Conclusões parciais

No presente capítulo, discutiram-se a formulação e a modelagem do sistema elétrico e do problema da expansão do sistema de transmissão. Esses são os primeiros passos para resolução do problema.

Trata-se de um problema de elevada natureza combinatória com inúmeras alternativas de expansão. Para tal, o próximo passo é encontrar uma maneira de otimizar o problema fazendo com que as melhores alternativas sejam escolhidas para redução de esforço computacional.

## 4 METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO

A metodologia escolhida para ser utilizada no nosso estudo foi o Algoritmo Genético. É uma técnica de busca com inúmeras características positivas. Ela é capaz de lidar com funções discretas e contínuas e com múltiplos objetivos, além de apresentar boas técnicas para atacar problemas de busca com espaços grandes e inacessíveis, que não conseguem ser solucionados por técnicas tradicionais [33].

O método em estudo faz parte de um conjunto de algoritmos, denominados inteligência artificial, onde os problemas de otimização são resolvidos através de ações naturais. Através do conceito de evolução das espécies, no qual indivíduos mais adaptados ao meio são escolhidos para sobreviver e reproduzir, de modo a obter uma solução próxima do ótimo global.

Os AGs são técnicas probabilísticas e por isso fornecem diferentes soluções a cada vez que são executados. Eles trabalham com uma população grande de pontos, sendo uma heurística de busca no espaço de soluções. A diferença dos mesmos para problemas de enumeração são que eles não buscam em todos os pontos e sim nas soluções que definem seus parâmetros. Apesar de ser um método de probabilidade, eles são diferentes dos métodos aleatórios, pois não fazem o uso de caminhadas aleatórias, e sim direcionam sua busca através de mecanismos de seleção [33].

Ao utilizar o AG, pode haver a manifestação de problemas no momento da convergência que conseguem ser evitados se o usuário possui alguma experiência. A diversidade é um desses problemas e acontece quando a população não é suficientemente diversificada fazendo com que a troca de material genético seja prejudicada e levando talvez a uma estagnação nas soluções. Há também a convergência prematura que é consequência de uma formulação irregular do modelo onde os genes de alguns indivíduos mais adaptados só que não suficientes, conseguem precipitadamente dominar a população fazendo com que o resultado convirja para um ótimo local.

### 4.1 HISTÓRICO

Os Algoritmos Genéticos são embasados no procedimento da seleção natural apresentado por Charles Darwin e também nas ferramentas de genética. Darwin constatou em seus estudos que de todos os seres vivos que nascem somente uma parte sobrevive e se reproduz. Alguns seres possuem particularidades mais minuciosas para lidar com condições ambientais, ou seja, tem mais possibilidades de sobrevivência. Esses têm maior chance de reproduzir e gerar descendentes. A cada vez que um novo descendente é gerado, as características favoráveis são conservadas e as não favoráveis descartadas [34].

Pesquisadores, nos anos 50 e 60, começaram a cogitar a teoria da evolução de



Darwin como um instrumento viável para problemas de otimização na engenharia. Posteriormente, no início da década de 70, John Holland [35] elaborou modelos onde os processos da adaptação natural conseguissem ser introduzidos para os sistemas computacionais, originando o Algoritmo Genético [34].

## 4.2 DEFINIÇÕES BÁSICAS

Nesta seção é feita uma comparação entre os termos utilizados na evolução natural e no AG [34]. Essa analogia pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1 – Analogia entre Evolução Natural e Algoritmo Genético

<b>Evolução Natural</b> $\Leftrightarrow$ <b>Algoritmo Genético</b>
Indivíduo $\Leftrightarrow$ Solução
Cromossomo $\Leftrightarrow$ Representação
Reprodução Sexual $\Leftrightarrow$ Operação de Cruzamento
Mutação $\Leftrightarrow$ Operador de Mutação
População $\Leftrightarrow$ Conjunto de Soluções
Gerações $\Leftrightarrow$ Iterações

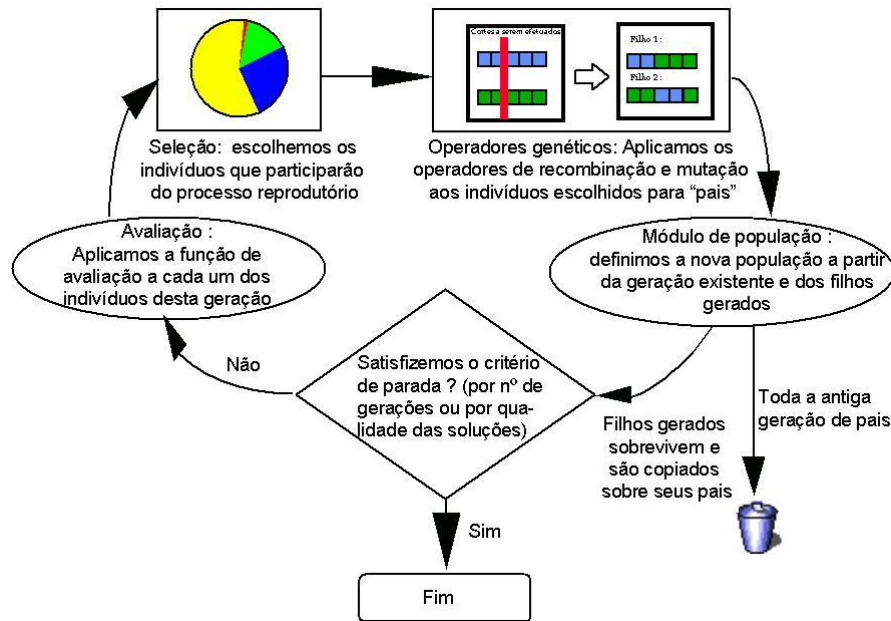
Fonte: Elaborada pela autora.

## 4.3 ESTRUTURA DOS ALGORITMOS GENÉTICOS

De acordo com [33], o funcionamento do AG pode ser apresentado de forma gráfica na Figura 4 e algoritmicamente através das etapas seguintes:

- Passo 1: Inicie a população de cromossomos;
- Passo 2: Analise cada cromossomo na população;
- Passo 3: Selecione os pais para gerar novos cromossomos;
- Passo 4: Utilize os operadores de recombinação e mutação a estes pais de modo a produzir os indivíduos da geração nova;
- Passo 5: Exclua os velhos membros da população;
- Passo 6: Analise os novos cromossomos e acrescente-os na população;
- Passo 7: Se o melhor cromossomo atende os requerimentos e desempenho, retorne-o, se não, volte para o terceiro passo.

Figura 4 – Estrutura do AG



Fonte: Linden,2012 [33].

#### 4.4 PARÂMETROS GENÉTICOS

A convergência e melhor performance dos AG's são controladas por diversos parâmetros. Essa influência vai depender da aplicação dos algoritmos.

##### 4.4.1 Tamanho da População

O tamanho da população apresenta grande sensibilidade em relação à performance do algoritmo genético. No caso de populações pequenas, o método não inclui um espaço de busca suficiente, podendo haver devido a isso uma convergência prematura. Já em relação a populações grandes, a desvantagem é o elevado tempo computacional. Então, a regulagem do tamanho da população deve ser de tal modo que o programa funcione conforme necessário e com a lembrança de que o número de indivíduos avaliados efetivamente é igual ao número de gerações executadas vezes o número de indivíduos na população [33].

##### 4.4.2 Taxa de Cruzamento

A taxa de cruzamento relaciona o número de indivíduos que irão gerar. Se a mesma for elevada, a população será capaz de diminuir o material genético devido à reposição da população pelo seus descendentes. Já para uma baixa taxa, o programa apresenta lentidão, porque haverá pequena variedade na população a cada geração.

### 4.4.3 Taxa de Mutação

A taxa de mutação tem relação com a quantidade de indivíduos que irão apresentar mutação. Quando a mesma é alta, o programa se torna arbitrário fazendo com que uma solução adequada possa não ser encontrada. Já quando o parâmetro é baixo, o programa pode permanecer estacionário em um valor que não é o ótimo.

### 4.4.4 Elitismo

Elitismo é uma ligeira mudança no tamanho da população que praticamente não modifica o tempo de processamento, porém assegura que a performance do algoritmo em questão aumente com o passar das gerações. Através desse método, os melhores indivíduos de cada geração não necessitam "morrer" com a sua geração, porém percorrer a subsequente de modo a assegurar que seus genomas sejam mantidos [33].

### 4.4.5 Convergência

O parâmetro genético da convergência nos mostra quando o problema encontrou uma solução o mais próxima possível da ótima. Três critérios são identificados em relação à convergência. Um deles é o número de gerações máximo, que não depende de o algoritmo chegar ou não em uma resposta adequada. No seguinte, computa-se a cada geração, a média e o maior montante da função de avaliação e se o resto da subtração entre os mesmos for inferior a certa tolerância, que deve ser próxima de zero, o programa converge. E finalmente, o terceiro tipo é um tempo de parada estável estabelecido e chega no resultado quando os tempos de corrente e prefixados são iguais.

## 4.5 FUNÇÃO DE AVALIAÇÃO

A função de avaliação, também chamada de função *fitness* ou de aptidão, é a função objetivo que se quer minimizar ou maximizar. Ela é a forma empregada pelos algoritmos genéticos para definir a importância de um indivíduo no momento da resolução do problema.

A função de aptidão tem o papel de ser determinada com elevada atenção. Esta deve incluir todo o conhecimento que se dispõe sobre o problema em estudo, tanto suas restrições quanto seus objetivos de qualidade [33].

## 4.6 OPERADORES GENÉTICOS

### 4.6.1 Operador de Seleção

A função de seleção escolhe os pais para a próxima geração com base em seus valores dimensionados da função *fitness*. Esse operador concebe uma população mais

adaptada ao meio em que os indivíduos estão inseridos tornando as gerações futuras mais evoluídas.

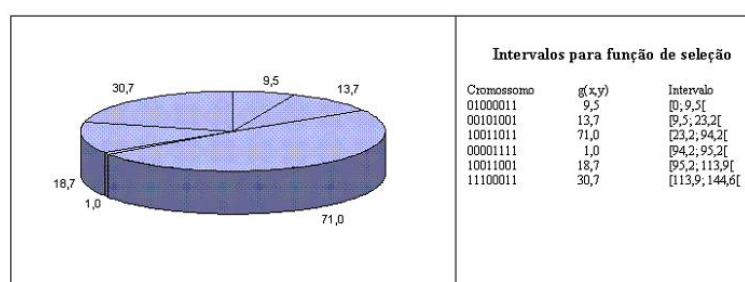
A concepção básica é que os indivíduos com função de avaliação alta devem ser beneficiados, sem ignorar totalmente aqueles com a função muito pequena. Isto deve ser feito pois até indivíduos com avaliações regulares podem apresentar características que sejam interessantes para o problema que está sendo analisado [33].

No *Matlab*, software utilizado no presente trabalho, pode-se especificar a função em que vai ser executada a seleção no campo da função Seleção. Existem vários tipos da mesma e no caso em estudo utilizou-se a Roleta. Ela simula uma roleta de cassino, onde a área de cada segmento é proporcional à sua expectativa. O algoritmo usa um número aleatório para selecionar uma das seções com uma probabilidade igual à sua área. A roleta irá ser rodada o mesmo número de vezes que a grandeza da população, então os indivíduos com melhor adaptação têm mais oportunidade de serem escolhidos.

Notoriamente a roleta não é capaz de ser girada em um programa de computador, devendo-se então lidar com conceitos abstratos, e não com a roleta propriamente dita. É necessário um algoritmo que simule a mesma e que deve presumir que nenhum indivíduo possua avaliação nula ou negativa.

Na Figura 5, pode-se ver um exemplo do método de seleção Roleta, onde os cromossomos são representados pelo indivíduo e  $g(x, y)$  pela função de avaliação.

Figura 5 – Exemplo do método de seleção Roleta



Fonte: Linden, 2012 [33].

#### 4.6.2 Operador de Cruzamento

O cruzamento combina dois indivíduos, ou pais, para formar um novo indivíduo, ou filho, para a próxima geração. Assim como na seleção, os bons aspectos dos pais devem ser passados para os filhos para que haja uma melhor adaptação ao meio.

No campo Cruzamento do *Matlab*, escolhe-se o tipo Heurística. Esse tipo cria filhos que se encontram aleatoriamente na linha que contém os dois pais, mais precisamente a

uma pequena distância do pai com o melhor valor de aptidão e na direção longe do pai com o pior valor de aptidão.

### 4.6.3 Operador de Mutação

O operador de mutação faz pequenas mudanças aleatórias nos indivíduos da população, fornecendo a diversidade genética e permitindo que o algoritmo genético procure um espaço mais amplo.

No software utilizado, especifica-se a função que realiza a mutação no campo da função Mutação. Escolhe-se a função Limitação Dependente. Ela vai optar pela Gaussiana se não houver restrições ou Adaptativa Factível caso contrário. Como o problema em estudo apresenta restrições, a mutação utilizada será a Adaptativa Factível.

A Mutação Gaussiana adiciona um número aleatório a cada entrada de vetor de um indivíduo. Este número aleatório é tomado de uma distribuição gaussiana centrada em zero. O desvio padrão desta distribuição pode ser controlado com dois parâmetros. O parâmetro Escala determina o desvio padrão na primeira geração. O parâmetro Encolhimento controla como o desvio padrão diminui à medida que as gerações passam. Se ele for 0, o desvio padrão é constante. Se for 1, o desvio padrão encolhe para 0 linearmente à medida que a última geração é alcançada.

A Mutação Adaptativa Factível gera aleatoriamente direções que são adaptáveis em relação à última geração bem sucedida ou mal sucedida. Um comprimento de passo é escolhido ao longo de cada direção de modo que restrições e limites lineares sejam satisfeitos.

## 4.7 CODIFICAÇÃO

A codificação, ou representação cromossomial, é indispensável para utilização dos operadores genéticos acima citados. O algoritmo genético lida com um indivíduo codificado formado por cromossomos ou caracteres, onde cada um desses demonstram uma variável que forma o indivíduo. Vale destacar que essa representação baseia-se em um modo de trasladar a informação contida no estudo em uma forma possível de ser utilizada pelo computador.

Cada parcela indivisível desta representação chama-se gene, por correspondência com as partes fundamentais que compõem um cromossomo biológico [33].

Na literatura, podem ser encontrados vários tipos de codificação. A utilizada no presente trabalho é o Binário. A mesma foi escolhida pois é o que o *Matlab* emprega na sua programação.

Esta representação é um dos tipos mais simples e a mais utilizada no ramo dos

algoritmos genéticos. Nela o cromossomo é representada por uma sequência de *bits*, que apresentam valores “0’s” ou “1’s”, onde cada gene é somente um *bit*. Este procedimento é de extrema importância, pois reprodução e mutação lidam com parâmetros codificados.

## 5 RESULTADOS OBTIDOS

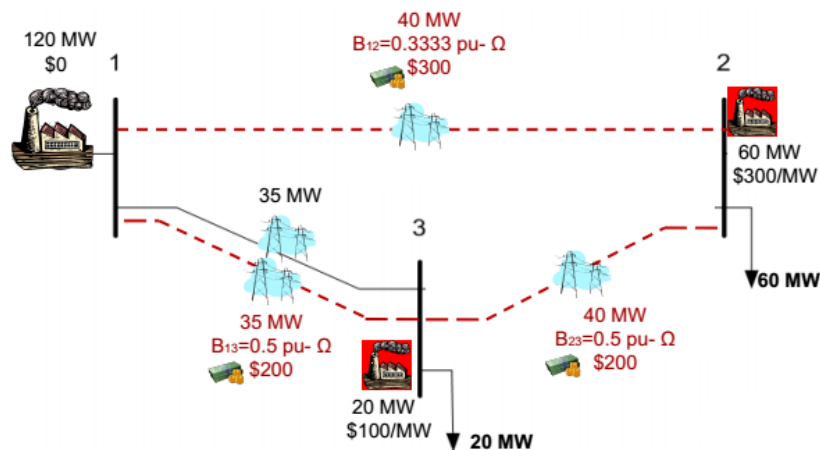
No presente capítulo são apresentados os resultados alcançados através da metodologia proposta para a resolução do problema em estudo. Os sistemas utilizados são quatro. Dois sistemas pequenos, um de três e outro de quatro barras; um proposto por Garver e outro real que representa a região Sul do Brasil.

No Apêndice A, podem ser vistos os dados completos de cada sistema, incluindo todos os caminhos existentes.

### 5.1 SISTEMA DE TRÊS BARRAS

O sistema apresentado na Figura 6 é composto por três barras, um circuito existente na topologia base, três caminhos candidatos à expansão e uma demanda prevista para o horizonte de planejamento de 80 MW.

Figura 6 – Sistema de Três Barras



Fonte: Silva Júnior, 2017 [36].

A resolução do problema através da *Toolbox* de Algoritmo Genético no *Matlab* deu-se através dos seguintes parâmetros: (i) tamanho da população: 200; (ii) contador de elitismo: 30; (iii) 100 gerações; (iv) função de tolerância e tolerância a restrições:  $1^{-100}$ . Também utilizou-se os parâmetros em questão para o sistema de quatro barras e o de Garver. Indicou-se os operadores genéticos no capítulo anterior, operadores esses que foram os mesmos para todos os sistemas estudados.

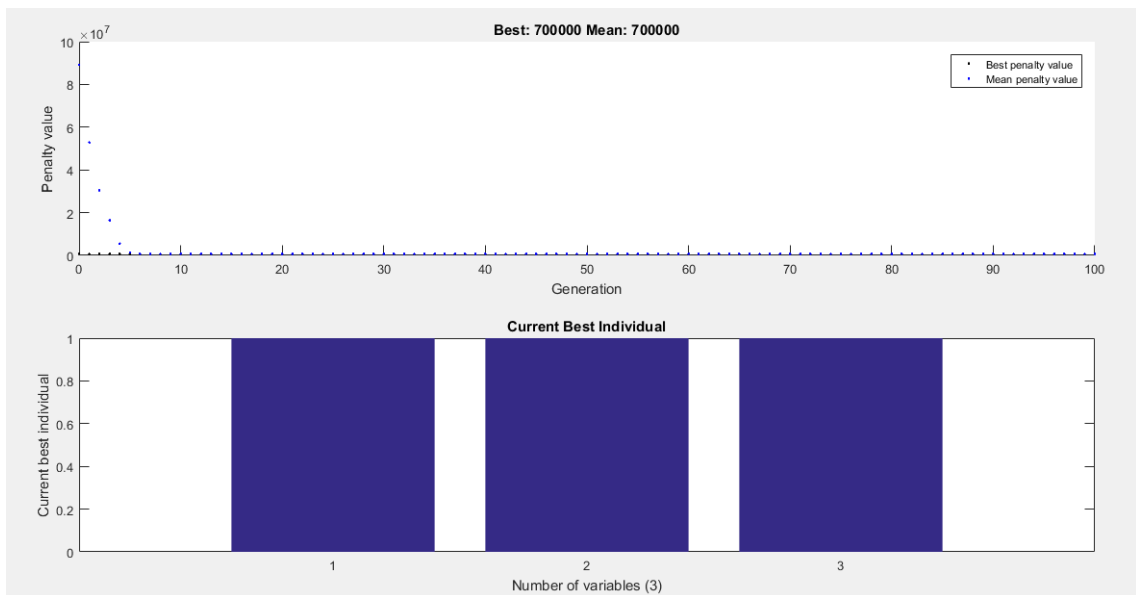
Obteve-se o resultado apresentado na Figura 7. E pode-se observar também na Tabela 2 quais são os circuitos candidatos à expansão. No presente sistema, três circuitos são candidatos com um custo de expansão de US\$700.000,00.

Tabela 2 – Planejamento da Expansão para o Sistema de Três Barras

<b>Caminhos Seleccionados</b>	<b>Circuitos Construídos</b>
1-2	1
1-3	1
2-3	1

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 7 – Sistema de Três Barras – Resposta AG



Fonte: Elaborada pela autora.

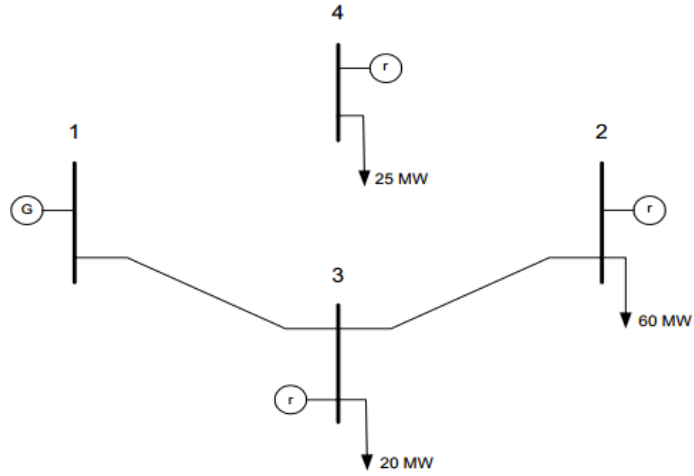
## 5.2 SISTEMA DE QUATRO BARRAS

Este sistema, mostrado na Figura 8, é constituído por quatro barras, cinco caminhos candidatos à expansão e dois circuitos existentes na topologia base, além de uma demanda esperada para o horizonte de planejamento de 105 MW.

Assim como na seção anterior obteve-se o resultado apresentado na Figura 9, pode-se observar também na Tabela 3 quais são os circuitos candidatos à expansão. No presente sistema, três circuitos são candidatos com um custo de expansão de US\$380.000,00.



Figura 8 – Sistema de Quatro Barras



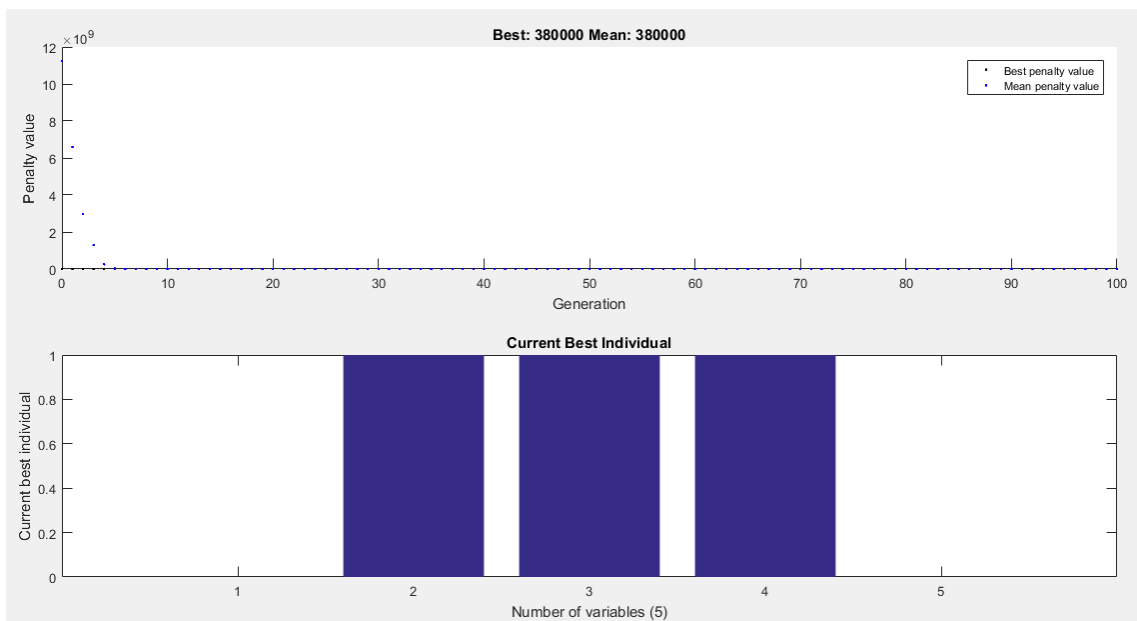
Fonte: Silva Júnior, 2003 [37].

Tabela 3 – Planejamento da Expansão para o Sistema de Quatro Barras

Caminhos Selecionados	Circuitos Construídos
1-3	1
2-3	1
1-4	1

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 9 – Sistema de Quatro Barras – Resposta AG



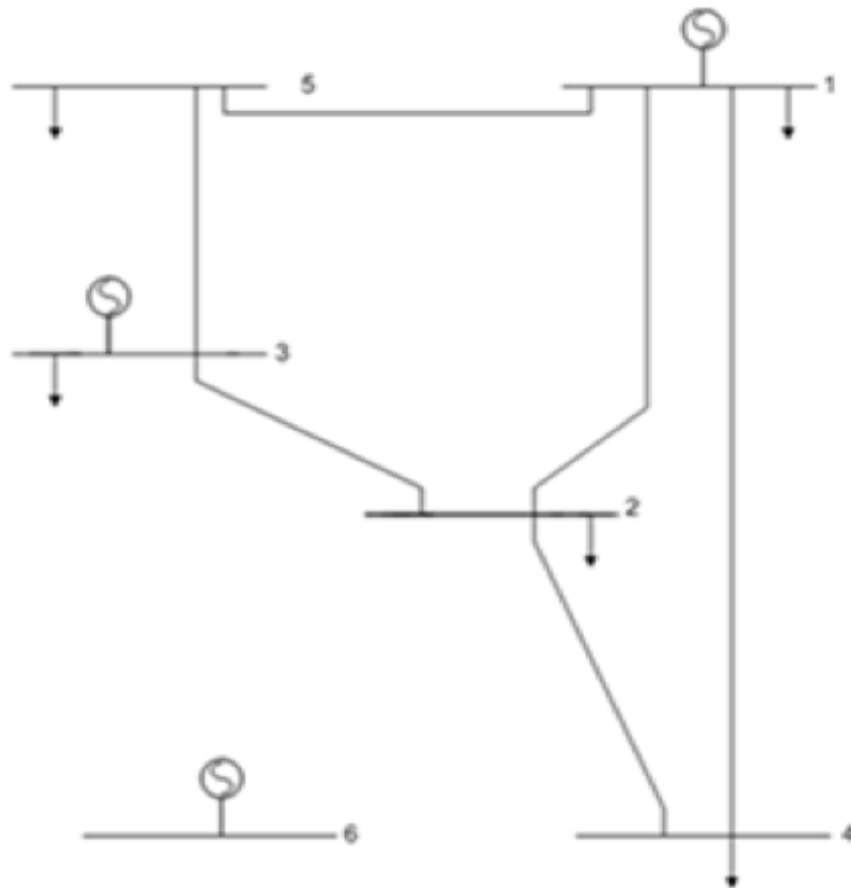
Fonte: Elaborada pela autora.

### 5.3 SISTEMA DE GARVER

Garver, em 1970, apresentou este sistema cuja topologia é vista na Figura 10. Ele é amplamente utilizado na literatura quando diz respeito à expansão da transmissão. O mesmo é composto por seis barras e o mesmo número de circuitos existentes. Apresenta também quinze caminhos candidatos à expansão e uma demanda esperada de 760 MW.

O presente estudo explicita os resultados da melhor forma e é feito para dois casos, um sem redespacho das unidades geradoras e outro caso em que é autorizado o redespacho dessas unidades.

Figura 10 – Sistema de Garver



Fonte: Moraes,2015 [6].

### • Sistema de Garver sem Redespacho de Geração

O sistema sem redespacho tem quatro expansões permitidas por rota, então tem-se um número total de alternativas de expansão de  $5^{15} = 30.517.578.125$ .

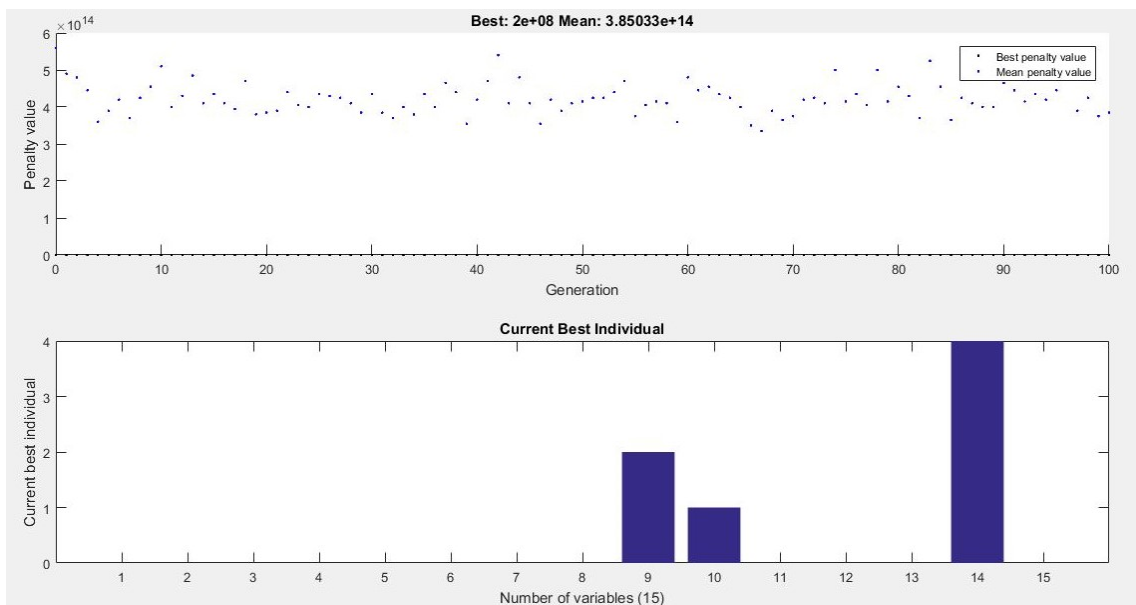
Assim como na seção anterior obteve-se o resultado apresentado na Figura 11. E pode-se observar também na Tabela 4 quais são os circuitos candidatos à expansão. No presente sistema três circuitos são candidatos com um custo de expansão de US\$200.000.000,00.

Tabela 4 – Planejamento da Expansão para o Sistema de Garver sem Redespacho

Caminhos Seleccionados	Circuitos Construídos
2-6	4
4-6	2
3-5	1

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 11 – Sistema de Garver sem Redespacho de Geração – Resposta AG



Fonte: Elaborada da autora.

### • Sistema de Garver com Redespacho de Geração

O sistema com redespacho apresenta três expansões permitidas por rota, então tem-se um número total de alternativas de expansão de  $4^{15} = 1.073.741.825$ .

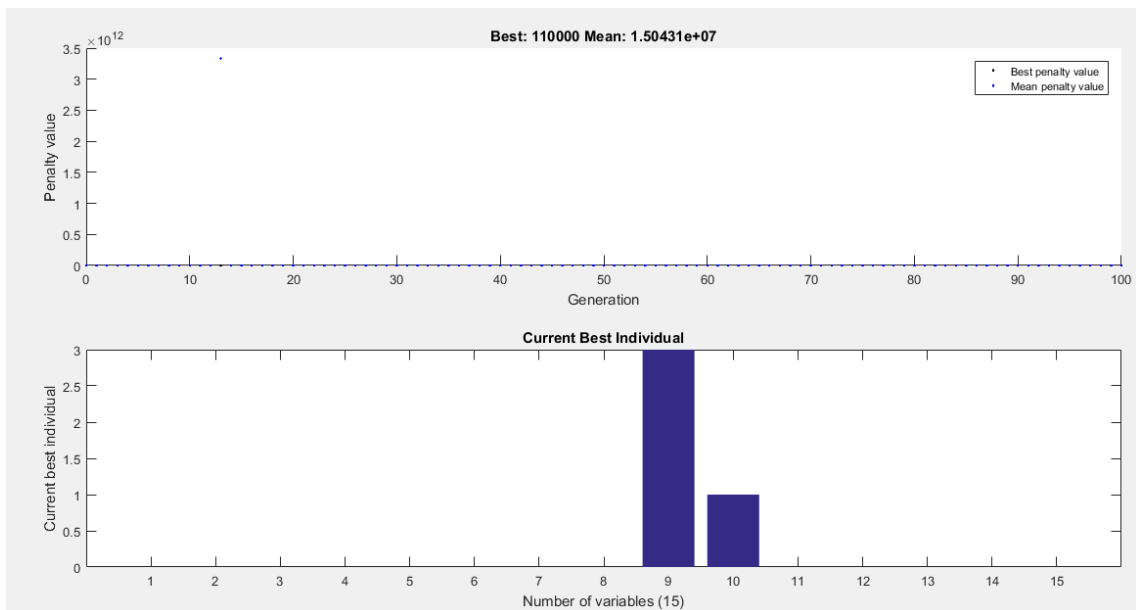
Novamente, como na seção anterior obteve-se o resultado apresentado na Figura 12. E pode-se observar também na Tabela 5 quais são os circuitos candidatos à expansão. No presente sistema dois circuitos são candidatos com um custo de expansão de US\$110.000.000,00.

Tabela 5 – Planejamento da Expansão para o Sistema de Garver com Redespacho

<b>Caminhos Selecionados</b>	<b>Circuitos Construídos</b>
4-6	3
3-5	1

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 12 – Sistema de Garver com Redespacho de Geração – Resposta AG



Fonte: Elaborada da autora.

#### 5.4 SISTEMA SUL

O sistema Sul é um sistema real que equivale à região Sul do Brasil, o mesmo foi utilizado pela primeira vez em [7] e tem tido grande apelo para o problema em estudo. A sua topologia pode ser vista na Figura 13.

Ele é formado primordialmente por quarenta e seis barras (46) com sessenta e seis (66) circuitos existentes e setenta e nove (79) caminhos candidatos à expansão. A sua demanda planejada é 6880 MW.

No presente sistema, foi feito o estudo somente sem redespacho das unidades geradoras e considerou-se apenas trinta caminhos possíveis de expansão. O mesmo tem três expansões permitidas por rota, então tem-se um número total de alternativas de expansão na ordem de  $4^{30}$ .

A resolução do problema através da *Toolbox* de Algoritmo Genético no Matlab deu-se através dos seguintes parâmetros: (i) tamanho da população: 300; (ii) contador de elitismo: 30; (iii) 3000 gerações; (iv) função de tolerância e tolerância a restrições:  $1^{-100}$ .

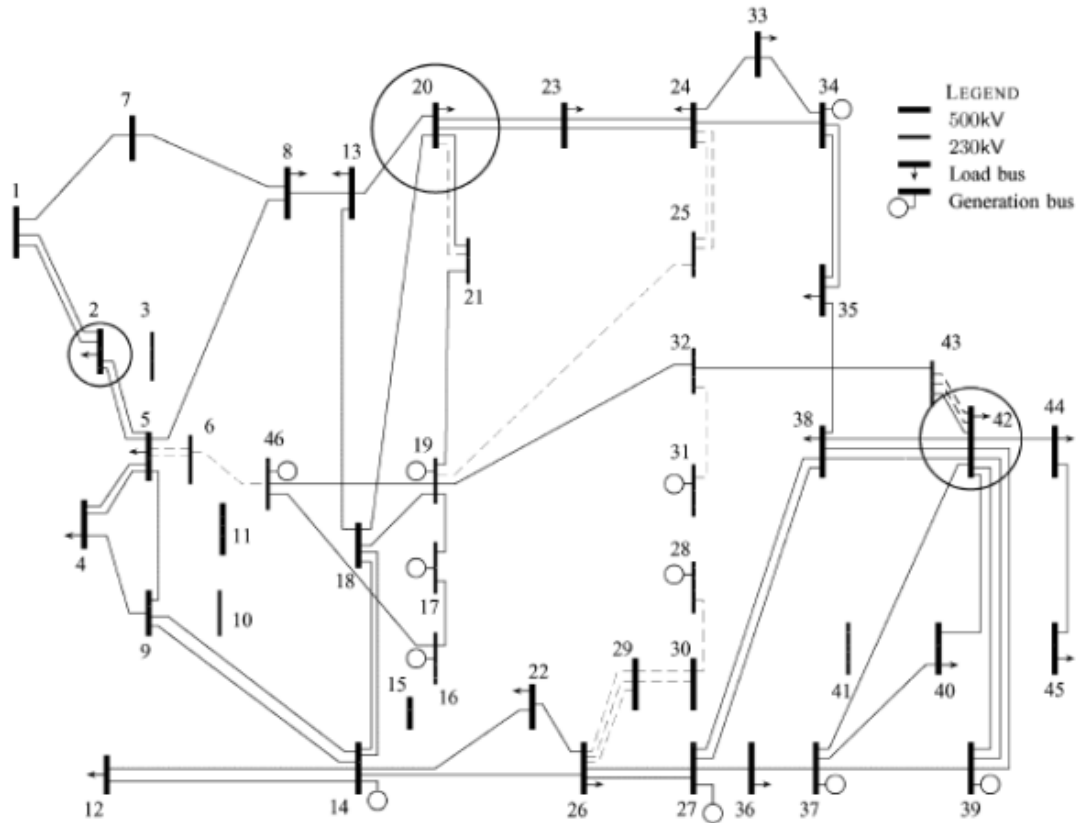
Obteve-se o resultado apresentado na Figura 14. E pode-se observar também na Tabela 6 quais são os circuitos candidatos à expansão. No presente sistema dez circuitos são candidatos com um custo de expansão de US\$154.508.000,00.

Tabela 6 – Planejamento da Expansão para o Sistema Sul

<b>Caminhos Selecionados</b>	<b>Circuitos Construídos</b>
29-30	2
20-21	1
42-43	2
46-6	1
19-25	1
31-32	1
28-30	1
26-29	3
24-25	2
05-06	2

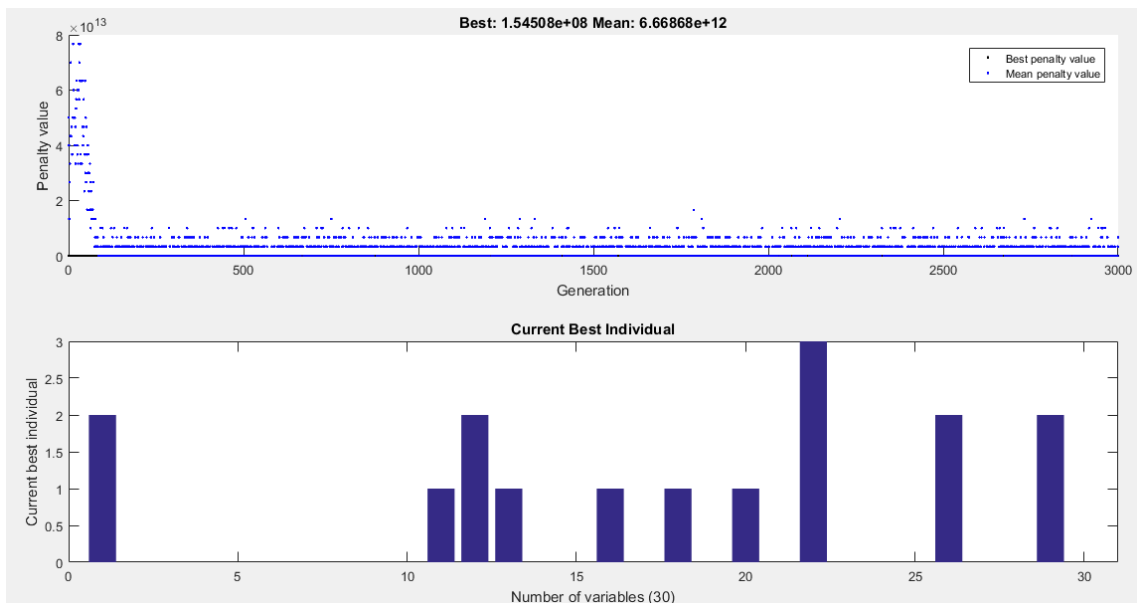
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 13 – Sistema Sul Equivalente do Brasil



Fonte: Mendonça,2012 [31].

Figura 14 – Sistema Sul – Resposta AG



Fonte: Elaborada pela autora.

## 6 PRINCIPAIS CONCLUSÕES DO TRABALHO

O presente trabalho apresentou o planejamento da expansão da transmissão de energia elétrica através de uma metodologia de resolução chamada de Algoritmo Genético.

Este estudo e planejamento têm crescido ao longo do tempo sendo umas das preferências no atendimento à demanda, especialmente no Brasil, que tem a matriz energética em grande parte hidráulica. Como as hidroelétricas se localizam distante dos grandes centros de carga, faz-se necessário um sistema de transmissão desenvolvido e bem planejado, para que não haja custos elevados [6].

### 6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram estudados dois sistemas pequenos, um com três e outro com quatro barras. Vimos que em sistemas dessa dimensão o AG apesar de chegar no resultado proposto apresenta um tempo computacional elevado em relação a enumeração exaustiva, por exemplo.

Também foram analisados outros dois um pouco maiores. Um sistema proposto por Garver em 1970 e outro que equivale à região Sul do Brasil. O sistema de Garver foi estudado com e sem redespacho das unidades geradores. Já o sistema Sul foi somente sem redespacho. Por serem sistemas de maior dimensão, o AG é mais interessante quando relacionado a esses sistemas; além de encontrar o ótimo global, ele faz isso com um tempo computacional satisfatório.

Como foi o dito, o AG é mais vantajoso para sistemas maiores, porém para esses sistemas os parâmetros devem ser escolhidos cuidadosamente, diferentemente dos sistemas menores que chegam no resultado através da utilização de qualquer parâmetro.

### 6.2 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros, podem-se destacar várias questões pertinentes, entre elas a escolha de melhores parâmetros para os sistemas maiores que propiciem uma redução no custo, conseguindo-se valores melhores que os encontrados na literatura.

Outro estudo interessante seria a inclusão de um algoritmo de Heurística Construtiva para ser empregado na solução inicial propiciando a diminuição das alternativas de expansão.

Outros acréscimos satisfatórios que poderiam complementar a presente pesquisa são o estudo da região Sul com redespacho de geração e a realização do Planejamento Dinâmico da Expansão da Transmissão.

## REFERÊNCIAS

- [1] EPE. *Plano Decenal de Expansão de Energia PDE 2024*. Rio de Janeiro, 2015. Acesso em: 01 fev. 2017. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/PDEE/Relatório Final do PDE 2024.pdf](http://www.epe.gov.br/PDEE/Relatório%20Final%20do%20PDE%202024.pdf)>.
- [2] ONS. *O que é o SIN - Sistema Interligado Nacional*. 2017. Acesso em: 02 fev. 2017. Disponível em: <<http://www.ons.org.br>>.
- [3] RESENDE, A. S. *Particle swarm optimization aplicada ao planejamento da expansão de sistemas de transmissão*. 161 p. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/110515>>.
- [4] GARVER, L. L. Transmission network estimation using linear programming. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-89, n. 7, p. 1688–1697, 1970.
- [5] NASCIMENTO, E. *Modelagem generalizada do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão*. 103 p. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/111137>>.
- [6] MORAES, C. A. *Heurística construtiva e otimização bioinspirada aplicada à expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2015.
- [7] MONTICELLI, A. et al. Interactive transmission network planning using a least-effort criterion. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101, n. 10, p. 3919–3925, 1982.
- [8] VILLASANA, R.; GARVER, L. L.; SALON, S. J. Transmission network planning using linear programming. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104, n. 2, p. 349–356, 1985.
- [9] PEREIRA, M. V.; PINTO, L. M. V. Application of sensitivity analysis of local supplying capability to interactive transmission expansion planning. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104, n. 2, p. 381–389, 1985.
- [10] ROMERO, R.; GALLEGO, R. A.; MONTICELLI, A. Transmission system expansion planning by simulated annealing. *IEEE Power Industry Computer Application Conference, Conference Proceedings*, p. 278–283, 1995.
- [11] GALLEGO, R. A. et al. Parallel simulated annealing applied to long term transmission network expansion planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 12, n. 2, p. 181–188, 1997.
- [12] CORTES-CARMONA, M.; PALMA-BEHNKE, R.; MOYA, O. Transmission network expansion planning by a hybrid simulated annealing algorithm. In: *IEEE. Intelligent System Applications to Power Systems 2009. ISAP'09. 15th International Conference on*. IEEE, 2009. p. 1–7.



- [13] SILVA, A. M. L. da et al. Performance comparison of metaheuristics to solve the multi-stage transmission expansion planning problem. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 5, n. 3, p. 360–367, 2011.
- [14] SILVA, A. M. L. da et al. Tabu search applied to transmission expansion planning considering losses and interruption costs. In: IEEE. *Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2008. PMAPS'08. Proceedings of the 10th International Conference on*. IEEE, 2008. p. 1–7.
- [15] SILVA, E. L. D. et al. Transmission network expansion planning under a tabu search approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 16, n. 1, p. 62–68, 2001.
- [16] GALLEGO, R. A.; ROMERO, R.; MONTICELLI, A. J. Tabu search algorithm for network synthesis. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 15, n. 2, p. 490–495, 2000.
- [17] MORI, H.; IIMURA, Y. Transmission network expansion planning with a hybrid meta-heuristic method of parallel tabu search and ordinal optimization. In: IEEE. *Intelligent Systems Applications to Power Systems, 2007. ISAP 2007. International Conference on*. IEEE, 2007. p. 1–6.
- [18] DEWANI, B.; DAIGAVANE, M.; ZADGAONKAR, A. A review of various computational intelligence techniques for transmission network expansion planning. In: IEEE. *Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2012 IEEE International Conference on*. IEEE, 2012. p. 1–5.
- [19] TORRES, S. P.; CASTRO, C. A. Parallel particle swarm optimization applied to the static transmission expansion planning problem. In: IEEE. *Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), 2012 Sixth IEEE/PES*. IEEE, 2012. p. 1–6.
- [20] TANGKANANURUK, W.; DAMRONGKULKAMJORN, P. Multi-zone transmission expansion planning using genetic algorithm. In: IEEE. *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2008. ECTI-CON 2008. 5th International Conference on*. IEEE, 2008. v. 2, p. 881–884.
- [21] ROMERO, R.; RIDER, M. J.; SILVA, I. d. J. A metaheuristic to solve the transmission expansion planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 22, n. 4, p. 2289–2291, 2007.
- [22] RATHORE, C. et al. Artificial bee colony algorithm based static transmission expansion planning. In: IEEE. *Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), 2013 International Conference on*. IEEE, 2013. p. 1126–1131.
- [23] ORFANOS, G.; GEORGILAKIS, P.; HATZIARGYRIOU, N. A recursive harmony search algorithm for security constrained transmission expansion planning. In: IEEE. *PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble*. IEEE, 2013. p. 1–6.
- [24] ARORA, S.; SINGH, S. A conceptual comparison of firefly algorithm, bat algorithm and cuckoo search. In: IEEE. *Control Computing Communication & Materials (ICCCCM), 2013 International Conference on*. IEEE, 2013. p. 1–4.

- [25] AGHAEI, J. et al. Generation and transmission expansion planning: Milp-based probabilistic model. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 29, n. 4, p. 1592–1601, 2014.
- [26] RATHORE, C.; ROY, R. A novel modified gbmo algorithm based static transmission network expansion planning. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 62, p. 519–531, 2014.
- [27] TORRES, S. P.; CASTRO, C. A. Specialized differential evolution technique to solve the alternating current model based transmission expansion planning problem. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 68, p. 243–251, 2015.
- [28] ALIZADEH, B.; JADID, S. A dynamic model for coordination of generation and transmission expansion planning in power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 65, p. 408–418, 2015.
- [29] HEMMATI, R.; HOOSHMAND, R.-A.; KHODABAKHSHIAN, A. Coordinated generation and transmission expansion planning in deregulated electricity market considering wind farms. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 85, p. 620–630, 2016.
- [30] ÖZDEMİR, Ö. et al. Economic analysis of transmission expansion planning with price-responsive demand and quadratic losses by successive lp. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 31, n. 2, p. 1096–1107, 2016.
- [31] MENDONÇA, I. M. de. *Planejamento Estático da Expansão de Sistemas de Transmissão utilizando Otimização por Enxame de Partículas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.
- [32] MONTICELLI, A. J. *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1983.
- [33] LINDEN, R. *Algoritmos Genéticos*. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2012. ISBN 978-85-399-0195-1.
- [34] SANGINETO, M. L. T. Um algoritmo genético para a programação de transferências em um poliduto. *Programa de Engenharia de Produção. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. COPPE/UFRJ*, 2006.
- [35] HOLLAND, J. H. Adaptation in natural and artificial systems. an introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence. *Ann Arbor, MI: University of Michigan Press*, 1975.
- [36] JÚNIOR, I. C. da S. *Material de Aula – Disciplina Planejamento da Expansão da Transmissão*. 2017.
- [37] JÚNIOR, I. C. da S. *Planejamento Estático da Expansão de Sistemas de Transmissão utilizando um novo algoritmo heurístico construtivo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2003.

## APÊNDICE A – Dados dos Sistemas de Transmissão

### A.1 SISTEMA DE TRÊS BARRAS

Tabela 7 – Dados de barra e geração – Sistema de Três Barras

Barra	Capacidade de Geração (MW)	Carga (MW)
1	120	0.0
2	0.0	60
3	0.0	20

Tabela 8 – Dados dos circuitos existentes – Sistema de Três Barras

Caminhos	Circuitos Existentes	Reatância ( $\Omega$ )	Capacidade (MW)
1-3	1	2.0	35

Tabela 9 – Dados dos circuitos candidatos – Sistema de Três Barras

Caminhos Candidatos	Reatância ( $\Omega$ )	Capacidade (MW)	Custo de Investimento (\$)
1-2	3.0	40	300
1-3	2.0	35	200
2-3	2.0	40	200

### A.2 SISTEMA DE QUATRO BARRAS

Tabela 10 – Dados de barra e geração – Sistema de Quatro Barras

Barra	Capacidade de Geração (MW)	Carga (MW)
1	120	0.0
2	0.0	60
3	0.0	20
4	0.0	25

Tabela 11 – Dados dos circuitos existentes – Sistema de Quatro Barras

Caminhos	Circuitos Existentes	Reatância ( $\Omega$ )	Capacidade (MW)
1-3	1	200	40
2-3	1	200	40

Tabela 12 – Dados dos circuitos candidatos – Sistema de Quatro Barras

<b>Caminhos Candidatos</b>	<b>Reatância (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Capacidade (MW)</b>	<b>Custo de Investimento (\$)</b>
1-2	300	30	300
1-3	200	40	90
2-3	200	40	90
1-4	200	40	200
2-4	200	40	200

### A.3 SISTEMA DE GARVER

Tabela 13 – Dados de barra e geração – Sistema de Garver

<b>Barra</b>	<b>Capacidade de Geração (MW)</b>	<b>Geração (MW)</b>	<b>Carga (MW)</b>
1	150	50	80
2	0.0	0.0	240
3	360	165	40
4	0.0	0.0	160
5	0.0	0.0	240
6	600	545	0.0

Tabela 14 – Dados dos circuitos existentes – Sistema de Garver

<b>Caminhos</b>	<b>Circuitos Existentes</b>	<b>Reatância (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Capacidade (MW)</b>
1-2	1	40	100
1-4	1	60	80
1-5	1	20	100
2-3	1	20	100
2-4	1	40	100
3-5	1	20	100

Tabela 15 – Dados dos circuitos candidatos – Sistema de Garver

<b>Caminhos Candidatos</b>	<b>Reatância (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Capacidade (MW)</b>	<b>Custo de Investimento (milhões de dólares)</b>
1-2	40	100	40
1-4	60	80	60
1-5	20	100	20
2-3	20	100	20
2-4	40	100	40
3-5	20	100	20
1-3	38	100	38
1-6	68	70	68
2-5	31	100	31
2-6	30	100	30
3-4	59	82	59
3-6	48	100	48
4-5	63	75	63
4-6	30	100	30
5-6	61	78	61

## A.4 SISTEMA SUL

Tabela 16 – Dados de barra e geração – Sistema Sul

Barra	Capacidade de Geração (MW)	Geração (MW)	Carga (MW)
1	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	443.1
3	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	300.7
5	0.0	0.0	238
6	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	72.2
9	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	511.9
13	0.0	0.0	185.8
14	1257	944	0.0
15	0.0	0.0	0.0
16	2000	1366	0.0
17	1050	1000	0.0
18	0.0	0.0	0.0
19	1670	773	0.0
20	0.0	0.0	1091
21	0.0	0.0	0.0
22	0.0	0.0	81.9
23	0.0	0.0	458.1
24	0.0	0.0	478.2
25	0.0	0.0	0.0
26	0.0	0.0	231.9
27	220	54	0.0
28	800	730	0.0
29	0.0	0.0	0.0
30	0.0	0.0	0.0
31	700	310	0.0
32	500	450	0.0
33	0.0	0.0	229.1
34	748	221	0.0
35	0.0	0.0	216.0
36	0.0	0.0	90.1
37	300	212	0.0
38	0.0	0.0	216
39	600	221	0.0
40	0.0	0.0	262.1
41	0.0	0.0	0.0
42	0.0	0.0	1607
43	0.0	0.0	0.0
44	0.0	0.0	79.1
45	0.0	0.0	86.7
46	700	599	0.0

Tabela 17 – Dados dos circuitos existentes – Sistema Sul

<b>Caminhos</b>	<b>Circuitos Existentes</b>	<b>Reatância (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Capacidade (MW)</b>
1-7	1	6.16	270
1-2	2	10.65	270
4-9	1	9.24	270
5-9	1	11.73	270
5-8	1	11.32	270
7-8	1	10.23	270
4-5	2	5.66	270
2-5	2	3.24	270
8-13	1	13.48	240
9-14	2	17.56	220
12-14	2	7.40	270
14-18	2	15.14	240
13-18	1	18.05	220
13-20	1	17.03	270
18-20	1	19.97	200
19-21	1	2.78	1500
16-17	1	0.78	2000
17-19	1	0.61	2000
14-26	1	16.14	220
14-22	1	8.40	270
22-26	1	7.90	270
20-23	2	9.32	270
23-24	2	7.74	270
26-27	2	8.32	270
24-34	1	16.47	220
24-33	1	14.48	240
33-34	1	12.65	270
27-36	1	9.15	270
27-38	2	20.8	200
36-37	1	10.57	270
34-35	2	4.91	270
35-38	1	19.80	200
37-39	1	2.83	270
37-40	1	12.81	270
37-42	1	21.05	200
39-42	3	20.30	200
40-42	1	9.32	270
38-42	3	9.07	270
32-43	1	3.09	1400
42-44	1	12.06	270
44-45	1	18.64	200
19-32	1	1.95	1800
46-19	1	2.22	1800
46-16	1	2.03	1800
18-19	1	1.25	600
20-21	1	1.25	600
42-43	1	1.25	600

Tabela 18 – Dados dos circuitos candidatos – Sistema Sul

<b>Caminhos</b>	<b>Reatância (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Capacidade (MW)</b>	<b>Custo de Investimento (milhões de dólares)</b>
1-7	6.16	270	4.35
1-2	10.65	270	7.08
4-9	9.24	270	6.22
18-20	19.97	200	12.74
19-21	2.78	1500	32.64
17-19	0.61	2000	8.72
20-23	9.32	270	6.27
40-42	9.32	270	6.26
32-43	3.09	1400	35.917
42-43	1.25	600	8.17
46-06	1.28	2000	16.00
46-03	2.03	1800	24.32
16-28	2.22	1800	26.36
19-25	3.25	1400	37.75
21-25	1.74	2000	21.12
31-32	0.46	2000	7.14
28-31	0.53	2000	7.82
28-30	0.58	2000	8.33
27-29	9.98	270	6.67
26-29	5.41	270	3.89
28-41	3.39	1300	39.29
31-41	2.78	1500	32.63
41-43	1.39	2000	17.29
24-25	1.25	600	8.17
29-30	1.25	600	8.17
40-41	1.25	600	8.17
02-03	1.25	600	8.17
05-06	1.25	600	8.17
09-10	1.25	600	8.1
20-21	1.25	600	8.17