

Sérgio Alexandre Martins Arruda

**Aplicação da otimização por enxame de partículas
com topologia "multi-ring" na estimação de
parâmetros de linhas de transmissão**

Goiânia, Brasil

2015

Sérgio Alexandre Martins Arruda

Aplicação da otimização por enxame de partículas com topologia "multi-ring" na estimação de parâmetros de linhas de transmissão

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica e de Computação. Área de Concentração: Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Goiás

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Pinheiro de Alvarenga

Coorientador: Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto

Goiânia, Brasil

2015

Ficha catalográfica elaborada automaticamente
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob orientação do Sibi/UFG.

Arruda, Sérgio Alexandre Martins

Aplicação da otimização por enxame de partículas com topologia "multi ring" na estimação de parâmetros de linhas de transmissão [manuscrito]
/ Sérgio Alexandre Martins Arruda. - 2015.

88 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Pinheiro de Alvarenga; co-orientador
Dr. Wesley Pacheco Calixto.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de
Engenharia Elétrica (EEEEC), Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia, 2015.

Bibliografia. Anexos. Apêndice.

Inclui siglas, mapas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráfico,
tabelas, algoritmos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Linhas de transmissão de energia. 2. Campos elétricos e
magnéticos. 3. Otimização por enxame de partículas. 4. Topologia multi
ring.. I. Alvarenga, Bernardo Pinheiro de, orient. II. Calixto, Wesley
Pacheco, co-orient. III. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS (TEDE) NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Autor (a):	Sérgio Alexandre Martins Arruda		
E-mail:	salexmart@gmail.com		
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página?	<input checked="" type="checkbox"/> Sim	<input type="checkbox"/> Não	
Vínculo empregatício do autor			
Agência de fomento:		Sigla:	
País:		UF:	
		CNPJ:	
Título:	Aplicação da otimização por enxame de partículas com topologia "multi-ring" na estimação de parâmetros de linhas de transmissão		
Palavras-chave:	Linhas de transmissão de energia; Campos elétricos e magnéticos; Otimização por exame de partículas; Topologia multi-ring.		
Título em outra língua:	Application of particle swarm optimization with "multi-ring" topology in the estimation of transmission line parameters		
Palavras-chave em outra língua:	Power transmission lines; Electric and magnetic fields; Particle swarm optimization; Multi-ring topology.		
Área de concentração:	Engenharia Elétrica		
Data defesa: (dd/mm/aaaa)	03/11/2015		
Programa de Pós-Graduação:	Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação		
Orientador (a):	Prof. Dr. Bernardo Pinheiro de Alvarenga		
E-mail:			
Co-orientador (a):*	Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto		
E-mail:			

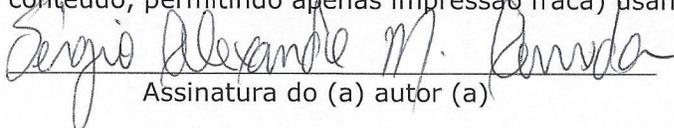
*Necessita do CPF quando não constar no SisPG

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação.

O sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.


Assinatura do (a) autor (a)

Data: 24 / 11 / 15

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

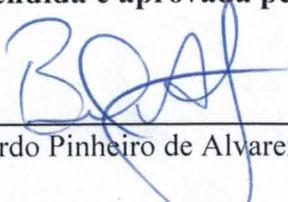


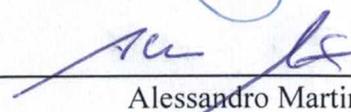
FOLHA DE APROVAÇÃO

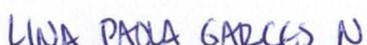
Aplicação da otimização por enxame de partículas com topologia “multi-ring” na estimação de parâmetros de linhas de transmissão

**SÉRGIO ALEXANDRE MARTINS
ARRUDA**

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída por:


Bernardo Pinheiro de Alvarenga – Orientador (EMC/UFG)


Alessandro Martins – UFG/Jataí


Lina Paola Garces Negrete (EMC/UFG)

Goiânia, 03 de novembro de 2015

Dedico este trabalho à minha esposa Sirlene, aos meus filhos Isabela e Rafael, aos meus pais Janete e Silmar, e a meus irmãos Márcia, Maysa e Marcus, por tudo o que vocês significam para mim.

Agradecimentos

No término de uma caminhada, muitos são os agradecimentos que se têm a fazer e a gratidão a demonstrar àqueles que nos ajudaram e sustentaram pelo caminho, muitas vezes árduo e difícil, mas extremamente jubiloso e gratificante ao fim.

Agradeço, com imensa alegria, ao Deus maravilhoso pela proteção e amparo íntimo nos momentos de maior angústia e dificuldades durante a execução deste trabalho. Pai Eterno, grato sou ao Seu imenso amor!

À minha companheira e esposa, Sirlene, obrigado por toda a paciência e carinho nos momentos de minha ausência e pelas constantes palavras de incentivo. Sem você minha experiência nesse período não teria sido tão engrandecedora.

Aos meus pequeninos filhos, Isabela e Rafael, que, no futuro, ao ler este trabalho, poderão compreender em que o papai sempre estava trabalhando a toda hora, por tudo o que representam para mim.

Aos meus pais, Janete e Silmar, e aos meus irmãos, pela compreensão e força em diversos momentos e pelo constante amparo familiar durante toda minha vida.

Agradeço ao meu orientador Prof. Bernardo Pinheiro Alvarenga pela oportunidade deste mestrado e por toda a orientação e paciência em sua condução, sempre apontando o caminho mais adequado a seguir.

Agradeço ao Prof. Wesley Pacheco Calixto pelas palavras de incentivo, pela ajuda e enorme disponibilidade em momentos críticos do desenvolvimento deste trabalho, muito obrigado.

Ao colega Arthur Melo pela colaboração em um momento importante e pela ajuda durante as medições.

Ao pessoal da concessionária de energia, que se dispôs a colaborar com as medições.

À ANATEL, pela compreensão nas ocasiões em que foi necessário alterar meu horário de trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), (Chamada Universal, 05/2012, processo 201200556060613) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

Enfim, a todos, que de uma forma ou outra, colaboraram para a produção desta dissertação.

*“O Senhor é quem vai adiante de ti;
ele será contigo, não te deixará, nem te desampará;
não temas, nem te atemorizes.
(Bíblia Sagrada, Deuteronômio 31, 8)*

Resumo

O mundo atual demanda alta disponibilidade de energia elétrica para equipamentos diversos, em um contexto em que predomina o uso intensivo de tecnologia. A energia elétrica é transportada dos centros de geração até os consumidores por meio de Linhas de Transmissão (LTs), que no Brasil possuem significativas dimensões, dados o tamanho continental do país e a matriz de geração predominantemente hídrica e localizada a longas distâncias dos grandes centros de consumo.

Para assegurar o atendimento dessa alta demanda, muitas vezes as concessionárias do sistema elétrico sobrecarregam essas LTs, gerando efeitos indesejáveis como a formação de flecha nos condutores, por exemplo. O monitoramento das condições de operação da LT é peça chave, portanto, para garantir a disponibilidade e segurança do sistema.

Este trabalho visa, nesse contexto, apresentar um método que auxilie no monitoramento de LTs trifásicas de circuito simples, com base na medição dos campos elétrico e magnético gerados pela linha e na aplicação de um procedimento de otimização baseado na metaheurística de Otimização por Enxame de Partículas (do inglês, *Particle Swarm Optimization*), com uma topologia denominada Multi-Ring, para estimar simultaneamente os valores da corrente, tensão, altura cabo-solo dos condutores e distância entre fases, em uma seção transversal da linha, podendo auxiliar as concessionárias e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) na tarefa de monitoramento.

Os bons resultados alcançados, aliados à maior simplicidade de implementação em relação a outros métodos e à sua robustez, indicam sua adequação para a estimação desses parâmetros. Associado a isso, os tempos razoavelmente baixos obtidos na execução o tornam promissor para aplicação por concessionárias e pelo operador do sistema como ferramenta auxiliar no monitoramento de LTs.

Palavras-chave: Linhas de transmissão de energia. Campos elétricos e magnéticos. Otimização por enxame de partículas. Topologia Multi-Ring.

Abstract

Present world demands high availability of electricity for various equipment, in a context in which dominates the intensive use of technology. The electricity is transported from generation centers to consumers through Transmission Lines (TLs), which in Brazil have significant dimensions, given the continental size of the country, his predominantly hydro power plant generation, located long distances from major centers consumption.

To ensure compliance of this high demand, often the electric power companies overload these TLs, generating undesirable effects, such as the formation of arrow in the conductors, for example. Monitoring of TL operating conditions is key part, therefore, to ensure system availability and security.

This work aims in this context to present a method to assist in the monitoring of three-phase TLs of simple circuit based on measurement of electric and magnetic fields of the line and in application of an optimization procedure based on Particle Swarm Optimization metaheuristic, with a topology denominated Multi-Ring, to estimate simultaneously the values of current, voltage, cable-ground clearance of conductors and distance between phases, in a cross section of the line, assisting electric power companies and the National Electric System Operator (ONS) in the monitoring task.

The good results achieved, combined with its simplicity of implementation compared to other methods and its robustness, indicate their suitability for estimating these parameters. Associated with this, the reasonably low times obtained in the execution make it promising for use by the electric power company and by the system operator as an auxiliary tool in monitoring TLs.

Keywords: Power transmission lines. Electric and magnetic fields. Particle swarm optimization. Multi-ring topology.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Mapa de distribuição das principais LTs do SIN. <i>Fonte:</i> (ONS, 2015)	18
Figura 2 – Representação do sistema elétrico completo e localização das linhas de transmissão. <i>Fonte:</i> (ABRADEE, 2015)	24
Figura 3 – Desenhos típicos de LTs trifásicas usadas no Brasil (<i>Fonte: Adaptada de (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 1982))</i>	26
Figura 4 – Alguns arranjos geométricos possíveis para condutores de fases de uma LT.	26
Figura 5 – Exemplos de perfis laterais de LTs de diferentes configurações geométricas dos condutores.	27
Figura 6 – Vista em perspectiva de uma LT e sistema de coordenadas adotado.	28
Figura 7 – Representação das dimensões relevantes para cálculo dos coeficientes de potencial de Maxwell e do campo elétrico de uma LT	29
Figura 8 – Exemplo de arranjo do feixe de condutores de fase de uma LT (<i>bundle</i>).	29
Figura 9 – Representação da polarização elíptica do campo magnético de uma LT. <i>Fonte:</i> Adaptado de (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 1982)	32
Figura 10 – Campo elétrico originado por diferentes geometrias de uma LT. Flat é a configuração horizontal. <i>Fonte:</i> (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 1982).	33
Figura 11 – Marcação de pontos de medição de campos elétrico e magnético sob uma LT de condutores dispostos horizontalmente	36
Figura 12 – Inclinação dos condutores na região próxima à torre da LT. <i>Fonte:</i> (GUIMARÃES, 2005)	37
Figura 13 – Inteligência de enxames biológicos	41
Figura 14 – Algumas topologias de vizinhança do PSO.	45
Figura 15 – Construção de solução no CPSO	56
Figura 16 – Topologia do PSO Multi-Ring. Os pontos representam as partículas e o traçado a interconexão entre elas. <i>Fonte:</i> adaptada de (BASTOS-FILHO et al., 2008)	57
Figura 17 – Rotação do anel no PSO Multi-Ring (<i>Fonte: adaptada de (BASTOS-FILHO et al., 2008))</i>	60
Figura 18 – Visão geral do método de estimação de parâmetros de LT por meio de otimização com PSO Multi-Ring.	65
Figura 19 – Fluxo de execução do método de estimação de parâmetros de LT por meio de otimização com PSO Multi-Ring.	66
Figura 20 – Representação de uma partícula	67
Figura 21 – Representação do espaço de busca.	68
Figura 22 – LT 01 - Local da medição (Goiânia)	74

Figura 23 – Campos medidos na LT 01	75
Figura 24 – Resultado da simulação 02 para a LT 01 usando PSO Multi-Ring de tamanho de anel = 3	78
Figura 25 – LT 02 - Local da medição (região metropolitana de Goiânia)	81
Figura 26 – Campos medidos na LT 02	82
Figura 27 – Resultado da simulação 9 para a LT 02 usando PSO Multi-Ring de tamanho de anel = 3	85
Figura 28 – Detalhe do EFA 200/300 - Analisador de campos eletromagnéticos em baixa frequência.	98

Lista de tabelas

Tabela 1 – Limites estabelecidos para variação dos parâmetros durante o procedimento de otimização.	69
Tabela 2 – Dados de carregamento da LT 01	73
Tabela 3 – Limites de variação dos parâmetros simulados durante a execução do método	74
Tabela 4 – Configuração dos parâmetros gerais do PSO Multi-Ring para a LT 01	74
Tabela 5 – Resultado de 10 simulações com tamanho de anel = 3	76
Tabela 6 – Erro percentual entre a corrente e a tensão encontradas nas 10 simulações com tamanho de anel = 3 e os dados reais de carregamento da LT 01	76
Tabela 7 – Solução para a LT 01 com tamanho de anel = 3	76
Tabela 8 – Resultado de 10 simulações com tamanho de anel = 6	79
Tabela 9 – Erro percentual entre a corrente e a tensão encontradas nas 10 simulações com tamanho de anel = 6 e os dados reais de carregamento da LT 01	79
Tabela 10 – Dados de carregamento LT 02	83
Tabela 11 – Configuração dos parâmetros gerais do PSO Multi-Ring para a LT 02	83
Tabela 12 – LT 02 - Resultado de 10 simulações com tamanho de anel = 3	83
Tabela 13 – Erro percentual entre a corrente e a tensão encontradas nas 10 simulações com tamanho de anel = 3 e os dados de carregamento da LT 02	84
Tabela 14 – Solução para a LT 02 com tamanho de anel = 3	84
Tabela 15 – Dados de medição de campo elétrico da LT 02 baixados do medidor EFA 200/300	101
Tabela 16 – Dados de medição de campo magnético da LT 01 baixados do medidor EFA 200/300	102
Tabela 17 – Dados de medição de campo elétrico da LT 02 baixados do medidor EFA 200/300	103
Tabela 18 – Dados de medição de campo magnético da LT 02 baixados do medidor EFA 200/300	104

Lista de abreviaturas e siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CPSO	Cooperative Particle Swarm Optimization
EPE	Empresa Brasileira de Pesquisa Energética
FIPS	Fully Informed Particle Swarm Optimization
gbest	global best
GCPSO	Garanted Convergence Particle Swarm Optimization
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical And electronics Engineers
lbest	lobal best
LT	Linha de Transmissão de Energia Elétrica
NPSO	Niching Particle Swarm Optimization
OMS	Organização Mundial de Saúde
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PSO	Particle Swarm Optimization
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Pontencial
VANT	Veículo Aéreo não Tripulado

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Motivação e Objetivo	17
1.2	Revisão Bibliográfica	19
1.3	Organização da Dissertação	22
2	CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE ELETROMAGNÉTICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA	24
2.1	Cálculo dos Campos Elétricos e Magnéticos de LTs	25
2.1.1	Cálculo do Campo Elétrico	27
2.1.2	Cálculo do Campo Magnético	30
2.1.3	Polarização elíptica dos campos	31
2.1.4	Efeitos de mudanças na geometria da LT sobre os campos elétrico e magnético	32
2.2	Medição de Campos Elétricos e Magnéticos de LTs	34
2.2.1	Procedimentos de medição dos campos elétrico e magnético de LTs	35
2.3	Interferências na medição	36
2.4	Importância do monitoramento dos parâmetros geométricos e de carregamento de LTs	37
2.4.1	Faixa de servidão	37
2.4.2	Altura cabo-solo	38
2.4.3	Distância horizontal entre fases	38
2.4.4	Tensão e corrente de operação	38
2.5	Considerações Finais	39
3	OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS	40
3.1	Inteligência de Enxames	40
3.2	Otimização por Enxame de Partículas	42
3.2.1	Versão Básica do PSO	42
3.2.1.1	Ajuste de velocidade	43
3.2.1.2	Topologias de vizinhança social	43
3.2.2	Parâmetros básicos do PSO	46
3.2.3	PSO <i>gbest</i>	46
3.2.3.1	PSO <i>gbest</i> com fator de constrição	49
3.2.3.2	O algoritmo básico PSO <i>gbest</i>	50
3.2.4	PSO <i>lbest</i>	51
3.2.4.1	O algoritmo básico PSO <i>lbest</i>	52
3.3	Variações da versão básica do PSO	53

3.3.1	Fully Informed Particle Swarm Optimization (FIPS)	53
3.3.2	Garanted Convergence Particle Swarm Optimization (GCPSO)	54
3.3.3	Cooperative Particle Swarm Optimization (CPSO)	55
3.3.4	Niching Particle Swarm Optimization (NPSO)	56
3.3.5	PSO Multi-Ring	56
3.3.5.1	Troca de informações na topologia PSO Multi-Ring	57
3.3.5.2	Ferramenta de rotação do anel (<i>Ring Layer Rotation Skill</i>)	58
3.3.5.3	O algoritmo PSO Multi-Ring	60
3.4	Considerações finais	61
4	METODOLOGIA PROPOSTA PARA ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE LTS	63
4.1	Definição do problema de estimação de parâmetros de uma LT e modelagem proposta	63
4.2	Visão geral do método estimação de parâmetros de LT por meio de otimização, com base nos campos elétrico e magnético	65
4.3	Observações sobre as medições dos campos elétrico e magnético das LTs utilizadas na aplicação do método	67
4.4	PSO Multi-Ring aplicado à estimação de parâmetros de LTS	67
4.4.1	Inicialização e estabelecimento de restrições	68
4.4.2	Erro e função de avaliação	70
4.4.3	Penalização de uma partícula	70
4.4.4	Algoritmo PSO Multi-Ring aplicado à estimação de parâmetros de LTS	71
5	RESULTADOS	73
5.1	LT 01	73
5.1.1	LT 01 com PSO Multi-Ring com tamanho de anel = 3	74
5.1.2	LT 01 com PSO Multi-Ring com tamanho de anel = 6	78
5.2	LT 02	81
5.2.1	LT 02 com PSO Multi-Ring com tamanho de anel = 3	83
5.3	Considerações gerais sobre os resultados das simulações	85
6	CONCLUSÃO	87
	REFERÊNCIAS	90
	APÊNDICES	94
	APÊNDICE A – PROCEDIMENTOS OBSERVADOS NA MEDIÇÃO DOS CAMPOS NAS LOCAÇÕES DEFINIDAS	95

A.1	Medição do campo elétrico	95
A.2	Medição de campo magnético	95
	APÊNDICE B – MEDIDOR DE CAMPO UTILIZADO NAS MEDIÇÕES . . .	97
	ANEXOS	99
	ANEXO A – DADOS DE MEDIÇÃO DE CAMPOS ELÉTRICO E MAGNÉTICO DA LT 01	100
	ANEXO B – DADOS DE MEDIÇÃO DE CAMPOS ELÉTRICO E MAGNÉTICO DA LT 02	103

1 Introdução

1.1 Motivação e Objetivo

Em um mundo contemporâneo fortemente dependente da tecnologia, demanda-se alta disponibilidade de energia elétrica para vários equipamentos industriais, comerciais e residenciais. O transporte de energia elétrica é realizado por linhas de transmissão (LTs), que no Brasil são caracterizadas por sua longa extensão devido às grandes distâncias desde a geração, predominantemente de matriz hídrica, até os grandes centros de consumo, e às próprias dimensões continentais do País. Um exemplo de longa extensão é a LT Coletora Porto Velho - Araraquara 2, que possui aproximadamente 2.375 Km, em 600 kV CC, de acordo com dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

O sistema de produção e transmissão de energia elétrica do país é caracterizado como de grande porte, formado por múltiplos proprietários interligados, compondo o Sistema Interligado Nacional (SIN), que é responsável por 98,3% da energia elétrica disponível no país (ONS, 2015). As LTs possuem papel fundamental no SIN, pois permitem o intercâmbio permanente de energia entre os vários subsistemas que o compõem.

Segundo dados de 2011 do governo federal, o sistema de transmissão de energia elétrica brasileiro totaliza 107,4 mil Km de extensão (PORTAL BRASIL, 2015). A Figura 1 apresenta o mapa das principais LTs do SIN.

A Empresa Brasileira de Pesquisa Energética (EPE) estima que o consumo de energia crescerá à taxa de aproximadamente 3,9 % entre 2015-2024, e para atender esta demanda, muitas vezes as LTs sofrem carregamento muito acima do especificado em projeto, causando efeitos indesejáveis como o sobreaquecimento, e, conseqüentemente, a formação de flechas nos condutores (EPE, 2015). Além disso, questões ambientais, tais como fortes ventos, queda de raios ou variações de temperatura podem influenciar as condições de operação da LT.

O monitoramento de sistemas de transmissão como o brasileiro, marcados por grande complexidade e extensão, além de essencial e imprescindível à segurança da operação, não é tarefa simples, pelo que se pode perceber, no que se pressupõe que iniciativas que colaborem apresentando propostas sejam bem-vindas.

Os avanços no uso do monitoramento em LTs vêm permitindo não somente a operação mais segura, mas também significativos ganhos de produtividade destas, como a possibilidade de aumento do carregamento sem afetar a segurança.

Vários parâmetros elétricos e geométricos da LT devem ser constantemente monitorados para evitar problemas em sua operação. Dentre esses parâmetros, a altura cabo-solo, a

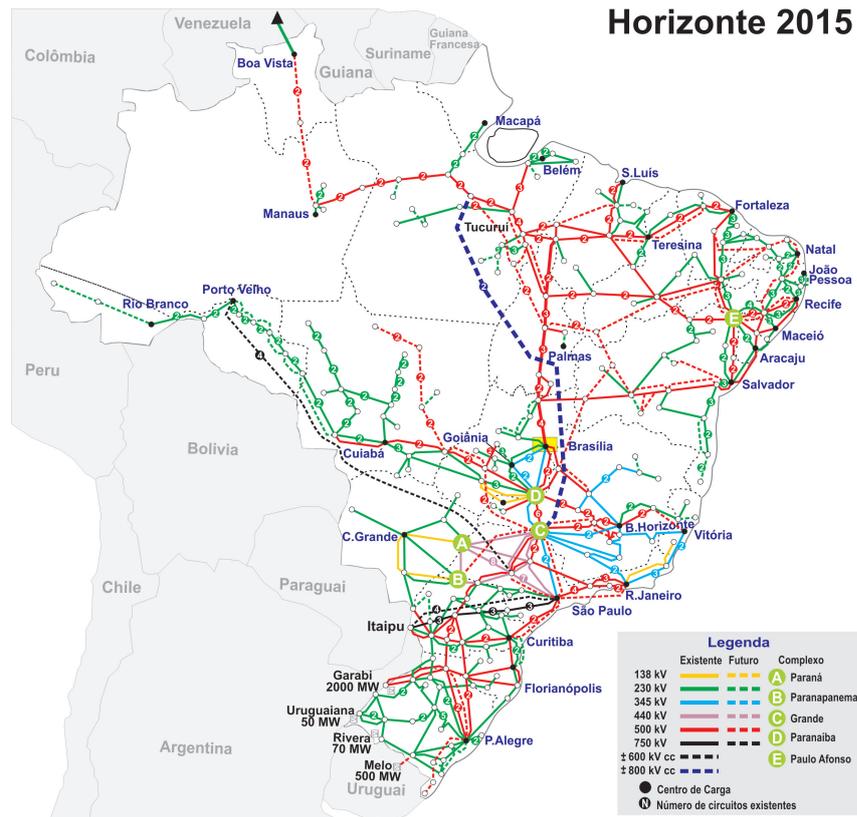


Figura 1 – Mapa de distribuição das principais LTs do SIN. Fonte: (ONS, 2015)

temperatura dos condutores, a tensão e a corrente de operação são fatores de destacada importância.

Diversos métodos e propostas nesse sentido têm sido desenvolvidos, incluindo-se sistemas eletroeletrônicos, mecânicos, ópticos e termo-ópticos.

Nesta dissertação, serão tratados os parâmetros altura cabo-solo, distância horizontal entre os condutores, corrente e tensão de operação da LT, por derivarem diretamente da metodologia que será proposta e por possuírem, sem desprezar-se os demais parâmetros que não serão por ora tratados, significativa importância na segurança da operação da LT.

A altura cabo-solo e a distância horizontal entre os condutores, podem ser medidas de forma direta, em campo, com uso de equipamentos tais como medidores ultrassônicos, hipsômetros a laser, dentre outros, ou de forma indireta, com o uso de sistemas de monitoramento específicos compostos de sensores acoplados ou não à LT.

Já a corrente e tensão de operação são tradicionalmente medidas por Transformadores de Corrente (TC) e Transformadores de Potencial (TP), que possuem alto custo e somente permitem leitura e medição centralizadas. Novos dispositivos têm sido propostos, especialmente com o uso de fibras e sensores ópticos para medição de corrente (NAZARÉ; WERNECK, 2010; SOUZA et al., 2014).

O monitoramento de todos esses parâmetros é usualmente realizado de forma não con-

junta, implicando em diversos procedimentos de monitoração distintos, com os custos e complexidades inerentes, além de em boa parte requererem total ou algum nível de contato físico de dispositivos à LT.

Nesse sentido, entende-se conveniente e oportuna uma metodologia que permita monitorar vários parâmetros simultaneamente e sem conexão de dispositivos à linha, simplificando e unificando procedimentos, com baixo custo, contribuindo aos estudos de monitoramento de LTs.

Durante sua operação, a LT gera campos elétricos e magnéticos perceptíveis em uma faixa de extensão significativa ao seu redor, os quais podem ser medidos ou calculados. Recentemente, tem crescido a preocupação, também no Brasil, com relação à exposição humana a esses campos, especialmente em áreas urbanas, devido à expansão das cidades até os limites dessas linhas. Com isso, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) editou a Resolução 398/2010, que regulamentou os limites de exposição humana a campos elétricos e magnéticos originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2010).

Conseqüentemente, as concessionárias de energia já buscam monitorar o nível de tais campos com intuito de atender à regulamentação. A proposta que será apresentada se baseia nos níveis medidos desses campos em uma seção transversal de LTs trifásicas.

Objetiva-se, portanto, o desenvolvimento de uma metodologia de estimação conjunta da corrente e tensão de operação, da altura cabo-solo e da distância horizontal entre fases, obtida a partir da medição dos campos elétricos e magnéticos em LTs trifásicas de circuito simples e da aplicação de um procedimento de simulação baseado em Otimização por Enxame de Partículas (PSO)¹.

Acredita-se que essa metodologia possa ser útil e interessante às empresas e às novas pesquisas relacionadas ao monitoramento de LTs, por ser simples e não demandar altos investimentos, e, também, por poder utilizar eventual infraestrutura e equipamentos já existentes para medição de campos elétricos e magnéticos.

Não se intentou, na presente dissertação, um sistema de monitoramento, mas uma metodologia amparada por paradigma alternativo que simplificasse os procedimentos existentes e que possa servir de substrato a futuros desenvolvimentos, como um sistema de monitoramento em tempo real baseado neste paradigma.

1.2 Revisão Bibliográfica

Um amplo trabalho realizado no escopo do Project UHV (Ultra high voltage), descrito em [Electric Power Research Institute \(1982\)](#), apresentou estudos detalhados de linhas de trans-

¹ do termo em inglês, Particle Swarm Optimization

missão de 345 kV e acima, notadamente sobre os efeitos dos campos elétricos e magnéticos gerados, como calculá-los e medi-los, bem com as tensões e correntes induzidas em pessoas e objetos.

Com foco na preocupação na exposição de seres humanos aos campos eletromagnéticos gerados por LTs e seus efeitos sobre a saúde, a Comissão Internacional de Proteção à Radiação Não-Ionizante (ICNIRP)² editou o documento *Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields*, estabelecendo recomendações quanto aos limites de exposição humana a campos elétricos e magnéticos de baixa frequência variantes no tempo (ICNIRP, 2010).

No Brasil, a Lei Federal 11.934/2009 e a Resolução ANEEL nº 398/2010 regulamentaram o assunto.

Alguns trabalhos publicados no Brasil sobre cálculo e medição de campos elétricos e magnéticos em LTs podem ser citados por sua pertinência ao tema, especialmente por análises relevantes, como Guimarães (2005), Souza (2012), Becker (2008), Moreira (2011), Guedes (2011), Filho (2008).

Recentemente, alguns trabalhos vêm propondo o uso dos campos elétricos e magnéticos como paradigma de monitoramento de LTs (SUN et al., 2013; LI, 2011). O assunto ainda é incipiente, e novas propostas podem e devem possivelmente surgir.

O uso de metaheurísticas para solução de problemas em sistemas elétricos têm ganhado cada vez mais espaço. Lee e El-Sharkawi (2008) apresentam vários estudos nesse sentido promovidos no âmbito do IEEE, com o uso de PSO, algoritmos genéticos, colônia de formigas, *simulated annealing*, e diversos outros podem ser encontrados em busca na Internet, o que demonstra que é um assunto que tem despertado o interesse de pesquisadores em todo o mundo.

Dentre essas metaheurísticas, o PSO, proposto por Kennedy e Eberhart (1995), é um método de otimização estocástica baseado em modelos de simulação social, empregando uma população de pontos que se movem estocasticamente no espaço de busca. Seu desenvolvimento tem por base os conceitos e regras que governam populações com organização social encontradas na natureza.

O PSO, diferentemente de outras técnicas metaheurísticas que surgiram para tratar problemas de otimização combinatorial, foi concebido para uso em problemas de otimização não linear, com variáveis contínuas. Variações do PSO para aplicação em problemas de otimização combinatorial com variáveis discretas também têm sido sugeridas, para tratar uma grande gama de problemas. Uma versão de PSO misto para tratamento de problemas com variáveis contínuas e discretas foi proposta por Yoshida et al. (2000) com resultados promissores. No entanto, não são o foco desta dissertação.

Devido à sua implementação ser simples, sua robustez e versatilidade, tem crescido a

² do inglês, *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*

aplicação do PSO em diversos tipos de problemas, incluindo em sistemas elétricos, apesar de ainda predominarem, nesta área, outras metaheurísticas que surgiram há mais tempo, como algoritmos genéticos. Contudo, o uso de PSO mostra-se muito promissor pelas qualidades descritas, motivo pelo qual justifica-se o interesse em utilizá-lo neste trabalho.

Associado a isso, a necessidade de melhorar a gestão, confiabilidade e controle da operação e manutenção de LTs levou ao surgimento de diversos sistemas de monitoramento. Há vários tipos disponíveis ou propostos, com foco na operação ou manutenção. Dentre os objetivos desses sistemas, incluem-se garantir a segurança de operação e pronta recuperação em caso de falhas. Em grande parte, esses sistemas buscam ampliar o carregamento da linha além do previsto em projeto, mantendo-se a segurança, alcançando maior capacidade de transmissão sem maiores investimentos em recapacitação, garantindo, assim, o atendimento à demanda crescente de energia elétrica, o que é verificado não só no Brasil, mas em todas as partes do mundo.

Em [TAESA e FINATEC \(2010\)](#) é apresentado um esforço importante de catalogação e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a LTs, no escopo de um projeto de pesquisa e desenvolvimento patrocinado pela TAESA S.A (Transmissora Aliança de Energia Elétrica S.A) e pela FINATEC (Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos, entidade ligada à UnB), e coordenado pela ANEEL, resultando em uma coletânea de estudos sobre o tema, havendo um capítulo específico sobre monitoramento de LTs. A iniciativa é interessante, pois o assunto monitoração de LTs é bastante abrangente e encontra-se disperso em diversos trabalhos, sobretudo artigos, e sua catalogação pode fornecer um panorama sobre o tema, ainda que breve, tendo em vista diversos outros trabalhos disponíveis na Internet.

Basicamente, os sistemas de monitoramento se baseiam em sensores, boa parte deles instalados em contato direto com a LT, para a medição de tensão, corrente, temperatura e flechas dos condutores, dentre outras variáveis.

Em relação à operação da LT, quanto ao monitoramento dos parâmetros geométricos, encontram-se propostas que usam a temperatura, a tensão mecânica de esticamento do condutor, e a medição direta por laser. No caso da corrente e tensão, usualmente recorre-se ao acoplamento de TC e TP à linha. Novos métodos, como medição baseada em fibra óptica, têm sido propostos mas sempre ligados, direta ou indiretamente, à LT ([NAZARÉ; WERNECK, 2010](#); [SOUZA et al., 2014](#)). A temperatura é monitorada principalmente por sensores térmicos ou termovisão com infravermelho.

Há ainda sistemas que dão suporte à operação da LT, e que se preocupam em monitorar as condições climáticas, a localização de defeitos, detecção do local da queda de raios, com o intuito de antecipar ou melhorar o processo de recuperação de falhas, reduzindo com isso o tempo de restauração da operação.

Para inspeção da linha há propostas de uso de robôs, desde VANTs (Veículos Aéreos

não Tripulados) a outros suspensos nos cabos para-raios, ou, por exemplo, de câmeras de infravermelho e ultravioleta telecontroladas.

Algumas características comuns dos sistemas da operação de LTs encontrados, são:

- Acoplamento de algum dispositivo ou sensor à LT;
- Razoável complexidade estrutural;
- Boa precisão nos resultados;
- Razoável custo de implementação;
- Necessidade de dispositivos distintos para cada parâmetro a ser observado.

Atualmente, há grandes preocupações em muitas empresas de energia elétrica quanto ao monitoramento de suas LTs, havendo razoáveis investimentos em pesquisas, tendo em vista os níveis de disponibilidade e qualidade determinadas pelo órgão regulador.

Dentre os estudos de técnicas de monitoramento que foram pesquisadas para a confecção desta dissertação, não foi encontrado nenhum que se propusesse a estimar simultaneamente a tensão, corrente, altura cabo-solo e distância horizontal entre fases, sobretudo sem acoplamento de dispositivos à linha.

Nesse sentido, a presente dissertação é relevante ao apresentar um método que se propõe a utilizar os campos elétricos e magnéticos da LT com esse intento, aplicado a LTs trifásicas CA, de circuito simples, com o uso de um procedimento de otimização ancorado no PSO.

1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação possui 6 capítulos e segue a organização descrita a seguir.

No capítulo 2 são apresentadas as metodologias de cálculo de campos elétricos e magnéticos em LTs, bem como é realizada análise dos efeitos provocados por variações nos parâmetros usados nesse cálculo. Também é apresentada a metodologia e normas aplicáveis às medições dos campos elétricos e magnéticos de LTs e são tecidos comentários sobre possíveis divergências que podem ocorrer entre cálculo e medição. O capítulo finaliza realizando a análise da importância de monitoramento de alguns parâmetros da LT que, de forma oportuna, podem ser obtidos a partir dos campos elétricos e magnéticos da LT, e tecendo algumas considerações finais.

O capítulo 3 tem como objeto o PSO. O modo de funcionamento, as topologias, parâmetros, as versões básicas, variações e alterações, bem como seu algoritmo, são apresentados.

Mais detalhadamente é apresentada a variação PSO Multi-Ring, que é utilizada como ferramenta de otimização nesta dissertação. É apresentada também uma breve visão de inteligência de enxames, que foi a base conceitual para o desenvolvimento do PSO.

A metodologia utilizada para estimação de parâmetros de LT utilizada na dissertação é apresentada no capítulo 4. Neste, é realizada a definição do problema de estimação de parâmetros de uma LT e é proposta uma modelagem para a solução. O método proposto é detalhado e é demonstrado o uso proposto do PSO Multi-Ring aplicado à estimação de parâmetros de LTs, bem como seu algoritmo adaptado ao problema.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos nas simulações realizadas em 2 LTs localizadas na região metropolitana de Goiânia, em que é avaliado o impacto de mudanças nas características do anel definido no PSO Multi-Ring e são analisadas condições impactantes na aplicação do método proposto.

Por fim, o capítulo 6 traz a análise final do método, com suas potencialidades e limitações e sugere futuros aperfeiçoamentos e pesquisas a serem realizados.

2 Caracterização do ambiente eletromagnético de linhas de transmissão de energia

No Brasil a energia elétrica percorre longo caminho desde a sua geração até chegar aos consumidores, sendo transportada por extensas linhas de transmissão (LTs). Esta característica peculiar, deve-se, principalmente, à base de geração energética predominantemente hídrica localizada a longas distâncias dos grandes centros de consumo.

A Figura 2 demonstra os componentes de um sistema elétrico e onde se inserem as LTs nesse contexto.



Figura 2 – Representação do sistema elétrico completo e localização das linhas de transmissão.
 Fonte:([ABRADEE, 2015](#))

As LTs geram campos elétricos e magnéticos inerentes à sua operação. A mensuração desses campos é importante por diversos motivos, desde questões ambientais e de saúde, como saber o nível de exposição a que a população em suas circunvizinhanças está submetida, a questões, ainda que indiretamente, de segurança e monitoramento da operação dessas linhas.

O campo elétrico advém das cargas elétricas dispostas em seus condutores. Já a movimentação dessas cargas produz o campo magnético.

Outros parâmetros devem também ser monitorados, como tensão, corrente, altura dos condutores (também denominada altura cabo-solo) e distância entre fases. Isso porque estes podem sofrer variações importantes durante a operação da LT, tanto por questões ambientais e meteorológicas, tais como fortes ventos ou tempestades, quanto por degradação ocasionada pelas próprias condições de operação.

Há grandes discussões de estudiosos da área sobre os impactos dos campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos, de uma forma geral, sobre a saúde humana, e sobre estratégias de mitigar a intensidade destes sobre as pessoas ([BECKER, 2008](#)). No entanto, este não é o foco deste trabalho e não será aqui tratado.

2.1 Cálculo dos Campos Elétricos e Magnéticos de LTs

No Brasil, nos países da América do Norte e em parte do Japão, é adotada a frequência de 60 Hz como padrão para os sistemas elétricos. Na Europa e na maior parte dos demais países é adotado o padrão de 50 Hz.

Considerando que operam em baixa frequência, os campos gerados pelas LTs são quase estacionários, e podem ser considerados desacoplados e independentes.

O campo elétrico é de natureza vetorial e é descrito por sua intensidade (E), dada em V/m (Volt/metro), considerando o Sistema Internacional de Medidas(SI). O campo magnético (H) também é um campo vetorial e tem sua intensidade dada em A/m (Amperes/metro). Na avaliação do campo magnético gerado por uma LT, contudo, usualmente é utilizada a densidade de fluxo magnético (B), a qual é descrita pela relação 2.1.

$$B = \mu_0 H \quad (2.1)$$

em que, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} (H/m)$ é a permeabilidade magnética do vácuo.

A densidade de fluxo magnético pode ser expressa em T (Tesla).

A partir da geometria da torre da LT, determina-se a disposição geométrica dos condutores em relação ao solo. A Figura 3 apresenta desenhos típicos de torres utilizadas no Brasil.

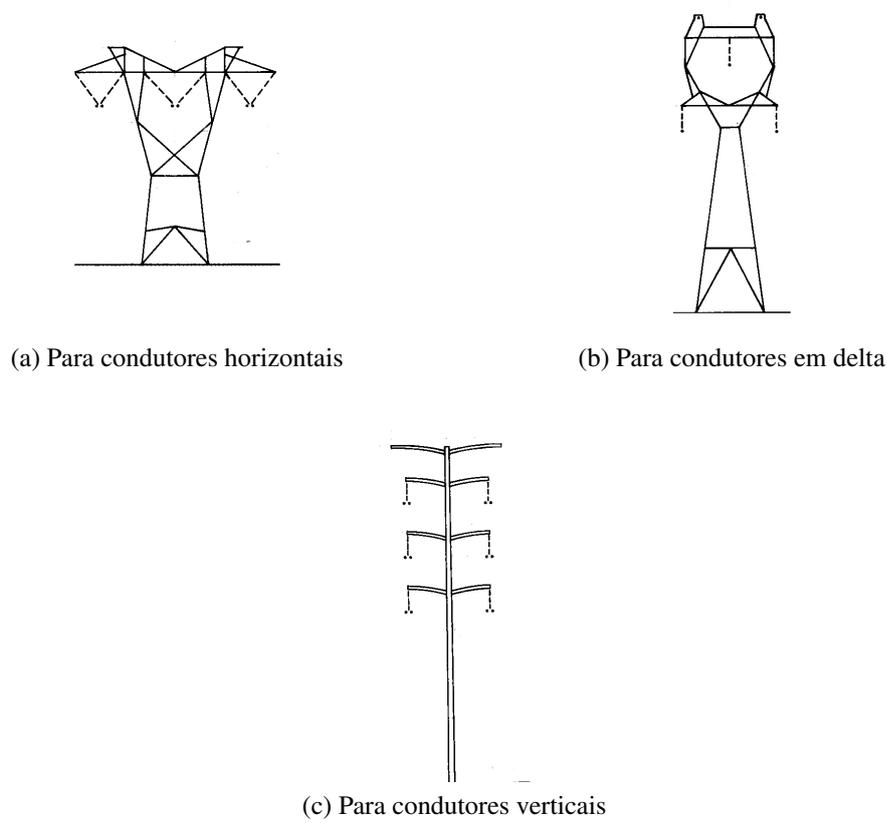


Figura 3 – Desenhos típicos de LTs trifásicas usadas no Brasil (*Fonte: Adaptada de (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 1982)*)

As disposições geométricas típicas dos condutores de fase são mostradas na Figura 4 e os seus respectivos perfis de campos elétrico e magnético característicos na Figura 5.

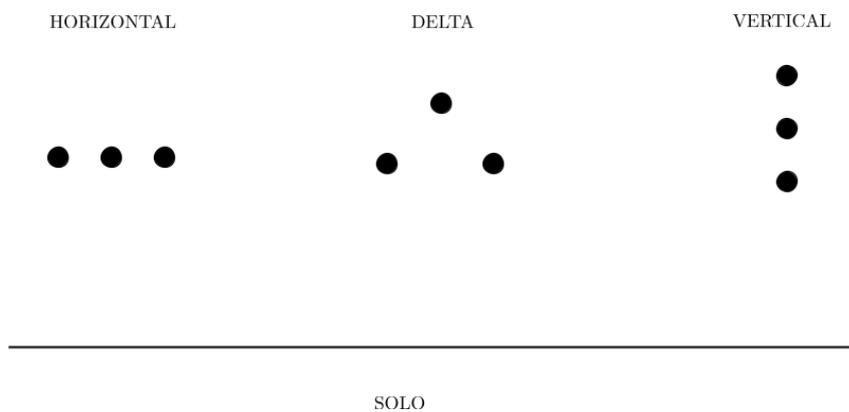
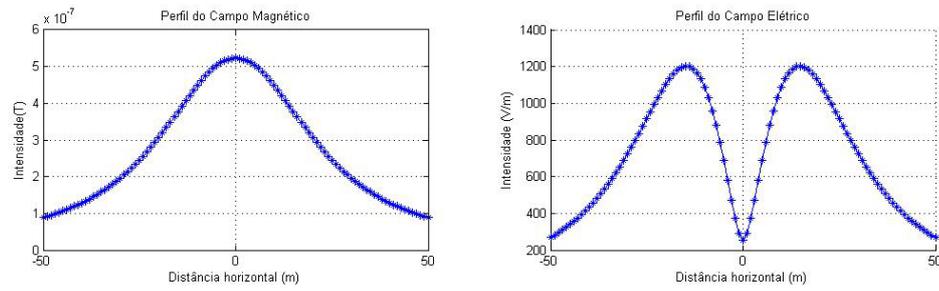
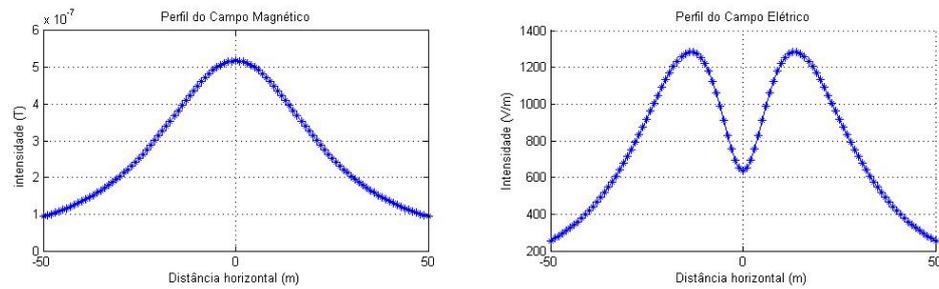


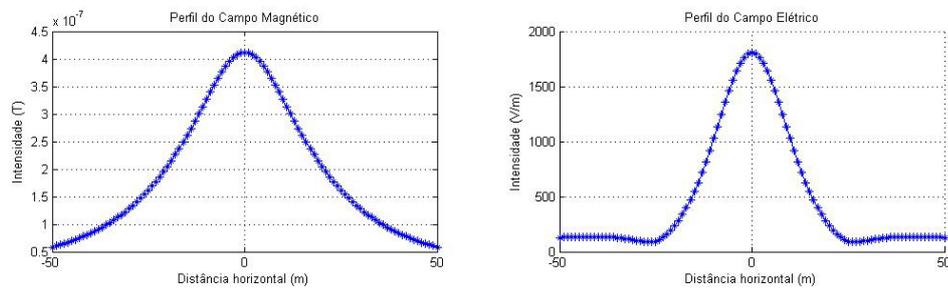
Figura 4 – Alguns arranjos geométricos possíveis para condutores de fases de uma LT.



(a) Horizontal



(b) Delta



(c) Vertical

Figura 5 – Exemplos de perfis laterais de LTs de diferentes configurações geométricas dos condutores.

Tomando uma vista em perspectiva de uma LT, define-se um sistema de coordenadas retangulares no qual o eixo z coincide com a direção longitudinal da LT, conforme ilustra a Figura 6.

2.1.1 Cálculo do Campo Elétrico

Para o cálculo do campo elétrico próximo à LT, é assumido que não existem cargas livres no espaço. Os valores instantâneos das cargas nos condutores da LT podem ser obtidos

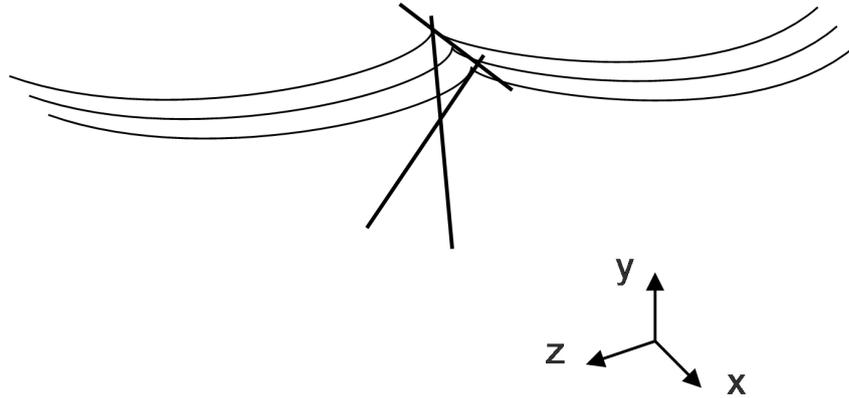


Figura 6 – Vista em perspectiva de uma LT e sistema de coordenadas adotado.

pelo método das cargas de Maxwell (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 1982). A relação entre as cargas nos condutores e o potencial nos mesmos é dada por (2.2).

$$[Q] = [P]^{-1} [\Phi_c] \quad (2.2)$$

na qual $[Q]$ (C) é o vetor de cargas instantâneas em cada condutor; $[\Phi_c]$ (V) é o vetor de potenciais elétricos de cada condutor, e $[P]$ (F^{-1}) é a matriz dos coeficientes de potencial de Maxwell. As dimensões de $[Q]$, $[\Phi_c]$ e $[P]$ estão relacionadas ao número de condutores da LT.

Para uma LT de condutores de fase paralelos, os coeficientes de potencial de Maxwell da matriz $[P]$ são dados por (2.3) e (2.4).

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{4y_i}{d_i}\right) \quad (2.3)$$

$$P_{ik} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{(x_i - x_k)^2 + (y_i + y_k)^2}{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2}\right)^{\frac{1}{2}}, i \neq k \quad (2.4)$$

Nas quais $\epsilon = 8.854 \cdot 10^{-12}$ (F/m) é a permissividade elétrica do ar, $x_i(m)$ e $x_k(m)$ são as posições horizontais dos condutores das fases “i” e “k”, respectivamente, $y_i(m)$ e $y_k(m)$ são as posições verticais dos condutores das fases “i” e “k”, respectivamente, e $d_i(m)$ é o diâmetro equivalente do condutor. Para uma fase com um único condutor, o diâmetro equivalente é o próprio diâmetro do condutor.

A Figura 7 demonstra as dimensões da LT relevantes para o cálculo dos coeficientes (2.3) e (2.4).

Para linhas em que há um “feixe” de condutores em cada fase (*bundle*), define-se o diâmetro equivalente do condutor de fase pela relação (2.5).

$$d_i = \sqrt[n]{d_{sub} \cdot z^{n-1}} \quad (2.5)$$

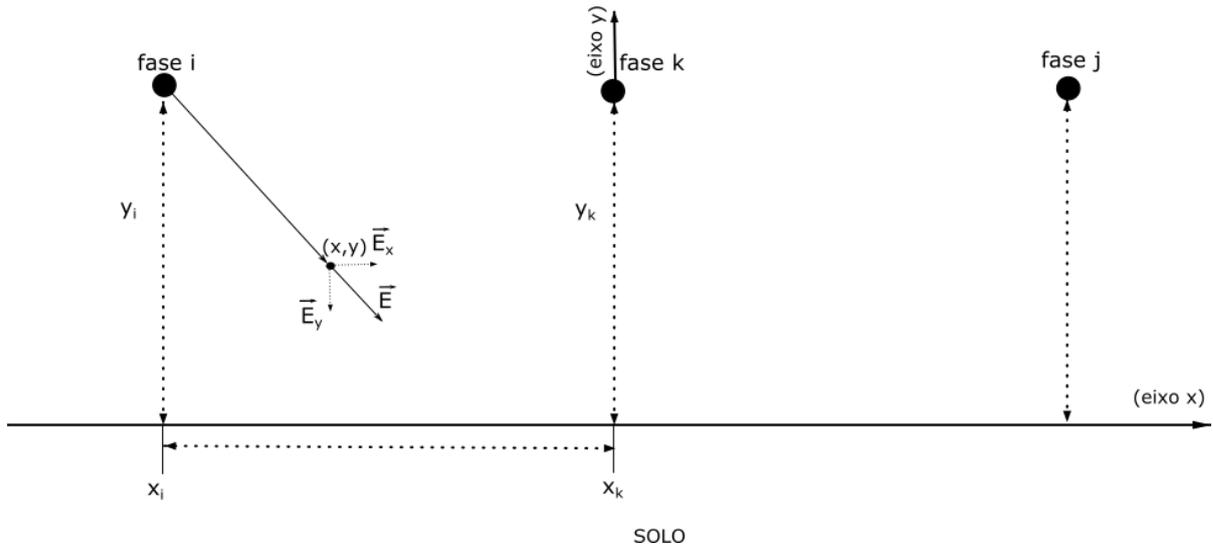


Figura 7 – Representação das dimensões relevantes para cálculo dos coeficientes de potencial de Maxwell e do campo elétrico de uma LT

na qual $d_{sub}(m)$ é o diâmetro do subcondutor; $z(m)$ é a distância entre os subcondutores; e n é o número de subcondutores do feixe. A Figura 8 exemplifica um arranjo de um *bundle* de um condutor da LT.

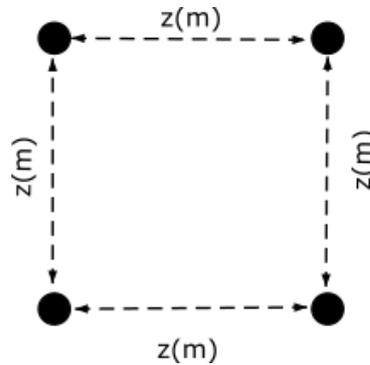


Figura 8 – Exemplo de arranjo do feixe de condutores de fase de uma LT (*bundle*).

A partir da geometria da LT e de sua distribuição de cargas (2.2), é possível determinar o vetor campo elétrico associado à LT no espaço livre (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 1982). Considerando a simetria em relação ao eixo z , o campo elétrico é representado no plano xy , perpendicular à LT. Seu valor é determinado por (2.6). A figura 7 demonstra as dimensões relevantes para o seu cálculo.

$$\vec{E}(x, y) = E_x(x, y) \cdot \vec{u}_x + E_y(x, y) \cdot \vec{u}_y \quad (2.6)$$

na qual E_x (V/m) e E_y (V/m) são os componentes do campo elétrico nas direções u_x e u_y , respectivamente. Para uma LT de N fases, esses componentes são dados por (2.7) e (2.8), res-

pectivamente.

$$E_x(x, y) = \sum_{i=1}^N E_{x,i}; \quad (2.7)$$

$$E_y(x, y) = \sum_{i=1}^N E_{y,i} \quad (2.8)$$

Nas quais

$$E_{x,i} = \frac{(q_{ri} + jq_{ii})(x - x_i)}{2\pi\epsilon[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2]} - \frac{(q_{ri} + jq_{ii})(x - x_i)}{2\pi\epsilon[(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2]} \quad (2.9)$$

$$E_{y,i} = \frac{(q_{ri} + jq_{ii})(y - y_i)}{2\pi\epsilon[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2]} - \frac{(q_{ri} + jq_{ii})(y + y_i)}{2\pi\epsilon[(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2]} \quad (2.10)$$

Nas expressões (2.9) e (2.10), $q_{ri}(C)$ e $q_{ii}(C)$ são as partes real e imaginária dos elementos de $[Q]$.

Por fim, a magnitude do campo elétrico resultante é obtida por (2.11).

$$|\vec{E}| = E = \sqrt{|E_x|^2 + |E_y|^2} \quad (2.11)$$

2.1.2 Cálculo do Campo Magnético

De forma idêntica ao campo elétrico, assume-se que o vetor densidade de campo magnético $\vec{B}(T)$ produzido por uma LT possui apenas os componentes horizontal e vertical, respectivamente.

A expressão da densidade de campo magnético produzida pela LT é dada por (2.12).

$$\vec{B}(x, y) = B_x(x, y)\vec{u}_x + B_y(x, y)\vec{u}_y \quad (2.12)$$

na qual os componentes B_x e B_y são dados, respectivamente, por (2.13) e (2.14).

$$B_x = \sum_{i=1}^N B_{xi} \quad (2.13)$$

$$B_y = \sum_{i=1}^N B_{yi} \quad (2.14)$$

De acordo com a Lei de Biot-Savart, os componentes B_{xi} e B_{yi} , para a fase "i", em uma posição (x, y) , são dados por (2.15) e (2.16), respectivamente.

$$B_{x,i} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{I_i(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \right] \quad (2.15)$$

$$B_{y,i} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{I_i(y - y_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \right] \quad (2.16)$$

nas quais $I_i(A)$ é o fasor da corrente de fase.

A magnitude da densidade de campo magnético resultante pode ser escrita como:

$$|\vec{B}| = B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}. \quad (2.17)$$

2.1.3 Polarização elíptica dos campos

Os campos elétrico e magnético de uma LT trifásica de corrente alternada podem também ser representados por vetores. Como a tensão e a corrente possuem natureza senoidal e fasorial, decorre que os campos têm uma parte real e outra imaginária que geram componentes nos eixos x e y , e cuja soma vetorial gera um vetor de campo girante, cujo módulo e direção variam com o tempo, descrevendo uma elipse para cada ciclo das tensões e correntes nos condutores da LT. O tipo de polarização é uma informação adicional útil para interpretação de resultados de medição.

Tomando como exemplo o campo magnético, a representação da polarização elíptica do campo é apresentada na Figura 9.

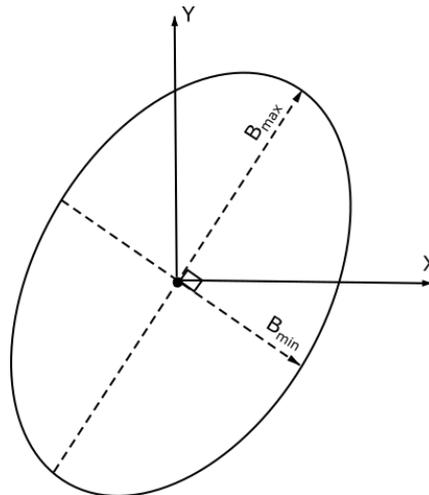


Figura 9 – Representação da polarização elíptica do campo magnético de uma LT. *Fonte:* Adaptado de (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 1982)

O comprimento do semi-eixo maior da elipse representa a magnitude máxima, e o comprimento do semi-eixo menor, a mínima, para a densidade de fluxo magnético.

A densidade de fluxo magnético resultante é expressa por:

$$B_r = \sqrt{B_{max}^2 + B_{min}^2} \quad (2.18)$$

De modo análogo, o campo elétrico resultante é dado por:

$$E_r = \sqrt{E_{max}^2 + E_{min}^2} \quad (2.19)$$

na qual E_{max} e E_{min} são os valores dos semi-eixos maior e menor do campo elétrico, respectivamente.

Percebe-se, da expressão (2.18), que o campo resultante é sempre maior ou igual a B_{max} . Isso porque, no caso de $B_{min} = 0$, diz-se que os campos são linearmente polarizados, e o campo resultante é dado apenas pelo componente máximo do campo, ou seja, $B_r = B_{max}$. Se $B_{max} = B_{min}$, diz-se que o campo é circularmente polarizado e $B_r = 1,41B_{max}$. A mesma análise pode ser realizada para o campo elétrico.

2.1.4 Efeitos de mudanças na geometria da LT sobre os campos elétrico e magnético

Os campos elétrico e magnético nas proximidades de uma LT são funções de seus parâmetros geométricos, além da tensão (para o campo elétrico) e da corrente (para o campo magnético). Tomando como exemplo a Figura 10, os perfis de campos elétrico e magnético podem ser alterados de acordo com as características de projeto da LT. Por exemplo, há diversos trabalhos que buscam minimizar os efeitos dos campos nas proximidades de LTs alterando

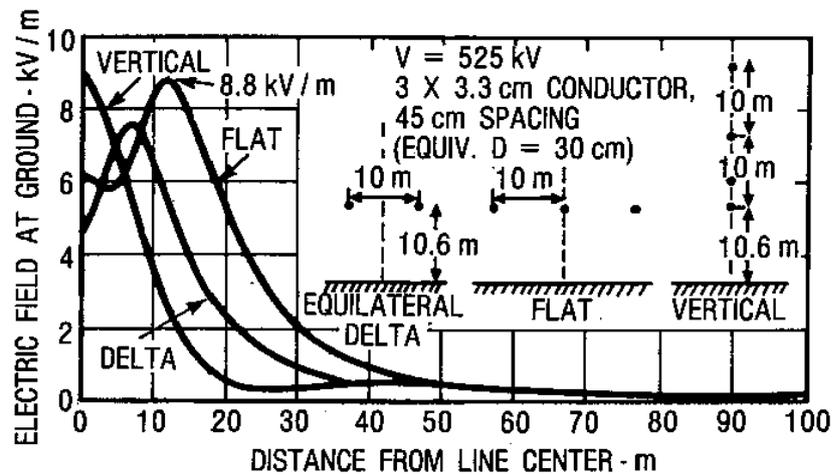


Figura 10 – Campo elétrico originado por diferentes geometrias de uma LT. Flat é a configuração horizontal. Fonte: (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 1982).

seus parâmetros geométricos em decorrência exatamente dessa interdependência entre os parâmetros geométricos e os campos gerados (BECKER, 2008; CRUZ, 2009; AL-SALAMEH; HASSOUNA, 2010).

Comentam-se, a seguir, alguns aspectos da relação entre os campos e a geometria da LT.

Ressalta-se para os comentários a seguir que as expressões “campo elétrico” e “campo magnético” referem-se aos valores destes campos medidos próximo ao solo.

- Arranjo de fases:

Dados 3 diferentes arranjos das fases de uma LT: horizontal, delta equilátero e vertical, quando todos os demais parâmetros são mantidos iguais (tensão, espaçamento entre fases e diâmetro dos condutores), o resultado obtido é que o campo elétrico ao nível do solo gerado pela configuração delta equilátero é a mais baixa dentre os três. Já a LT vertical possui decaimento rápido do valor do campo a partir do centro da linha. Isso pode ser visto na Figura 10.

Assim como ocorre com o campo elétrico, há grande influência da geometria sobre os valores da intensidade de campo magnético, e os arranjos do tipo delta são os que produzem o campo magnético menos intenso ao nível do solo (BECKER, 2008).

- Altura das fases:

A altura das fases é o parâmetro geométrico que produz alteração mais drástica em relação aos campos elétrico e magnético da LT (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 1982).

- Dimensões dos condutores:

Esse parâmetro possui influência somente sobre o campo elétrico, contudo esta influência é limitada ([ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 1982](#)).

- Espaçamento entre fases (compactação):

Linhas mais compactas, ou seja, em que as fases estão mais próximas umas das outras, produzem campos elétricos de intensidade mais baixa ao nível do solo ([ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 1982](#)). No entanto, a aproximação das fases pode aumentar ruídos audíveis e em ondas de rádio provocados pela LT, o que deve ser levado em conta.

A compactação também reduz o campo magnético ao nível do solo ([BECKER, 2008](#)).

As linhas ditas compactas têm sido bastante utilizadas e indicadas ultimamente para uso em ambientes urbanos, em que há restrições de espaço para a faixa de servidão e onde as pessoas estão mais suscetíveis à exposição aos campos ([DANKA JUNIOR, 2009](#)).

- Cabos pára-raios:

Na prática, quase não há influência dos cabos pára-raios na intensidade do campo elétrico ao nível do solo, com redução entre 1 e 2 % no nível do campo quando este está presente. Isto porque se localizam acima das fases, mais distantes do solo ([ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 1982](#)).

2.2 Medição de Campos Elétricos e Magnéticos de LTs

As medições de campos elétricos e magnéticos em LTs, são definidas por normas e procedimentos.

Internacionalmente, os principais documentos usados como referência para procedimentos de medição de campos elétricos e magnéticos são listados a seguir.

- IEC 61786-2, de 2014. Atualmente se encontra em sua terceira versão, sendo a inicial de 1998, e estabelece procedimentos básicos para medições de campos magnéticos de corrente contínua (CC), e de campos elétricos e magnéticos de corrente alternada (CA), quanto à exposição humana, na faixa de frequência de 1 Hz a 100 kHz, apresentando procedimentos de calibração e especificação dos instrumentos de medição ([IEC, 1998](#));
- IEEE std 644-1994 estabelece padrões de medição de campos elétrico e magnético de LTs em corrente alternada (CA) próximos ao solo ([IEEE, 1994](#)).
- *Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields*, em que são traçadas orientações à exposição humana a campos elétricos e magnéticos em baixa frequência (de 1 Hz a 100 kHz), com o intuito de prover proteção à saúde contra possíveis efeitos adversos da exposição ([ICNIRP, 2010](#)).

Os principais documentos normativos no Brasil são citados a seguir:

- A Lei Federal 11.934/2009 dispôs sobre limites de exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos. Tal Lei incumbiu a ANEEL de realizar o acompanhamento dos campos elétricos e magnéticos devidos aos em sistemas de transmissão de energia elétrica.
- A Resolução ANEEL nº 398/2010 regulamentou aspectos da Lei 11.934/2009, determinando procedimentos de medição de campos elétricos e magnéticos de LTs. Os limites de exposição fixados na Resolução foram baseados, inicialmente, em valores estabelecidos pela ICNIRP (Comissão Internacional de Proteção Contra Radiação Não Ionizante) e recomendados pela Organização Mundial de Saúde (OMS) (ICNIRP, 2010). Em 2014, a Resolução da ANEEL foi atualizada e passou a considerar apenas os valores estabelecidos pela ICNIRP. A Resolução 398/2010 possui importante papel, servindo como baluarte para homogeneização dos níveis a serem respeitados pelo setor elétrico brasileiro, permitindo julgamento, de forma objetiva, quanto a infrações aos limites estabelecidos. A medição, de acordo com a Resolução, deve ser realizada a 1,5 m do solo.
- A norma técnica NBR 5.422, de 2001, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), possui foco na instrumentação, métodos de medição e nos valores de referência à exposição humana a campos produzidos por dispositivos que operam na frequência industrial (50 e 60 Hz). Cabe esclarecer que os aspectos relativos aos limites de exposição nesta norma foram suplantados pela regulamentação dada pela Resolução 398/2010 da ANEEL.
- A norma técnica NBR 15.415 da ABNT, de 2006, estabelece uma metodologia de medição de campos elétricos e magnéticos em 50 e 60 Hz, em instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica acima de 1 kV, definindo a terminologia, requisitos e especificação de medidores, características gerais dos campos e métodos de medição.

2.2.1 Procedimentos de medição dos campos elétrico e magnético de LTs

Primeiramente, é importante caracterizar o ambiente em que será realizada a medição, preferencialmente através de levantamento *in loco*. Nesse levantamento, questões que podem interferir na determinação de intensidade dos campos devem ser consideradas.

Obstáculos próximos à LT medida devem ser levados em conta, tais como árvores, torres, cercas e plantas altas. Do mesmo modo, outras fontes de campos elétricos e magnéticos, sobretudo na frequência de operação 60 ou 50 Hz devem ser identificadas. Como exemplo, outra LT próxima pode influenciar os valores dos campos a serem medidos.

É importante que os equipamentos utilizados sejam apropriados. Existem vários tipos de medidores disponíveis. A norma IEEE std 644-1994 indica a utilização de medidores de

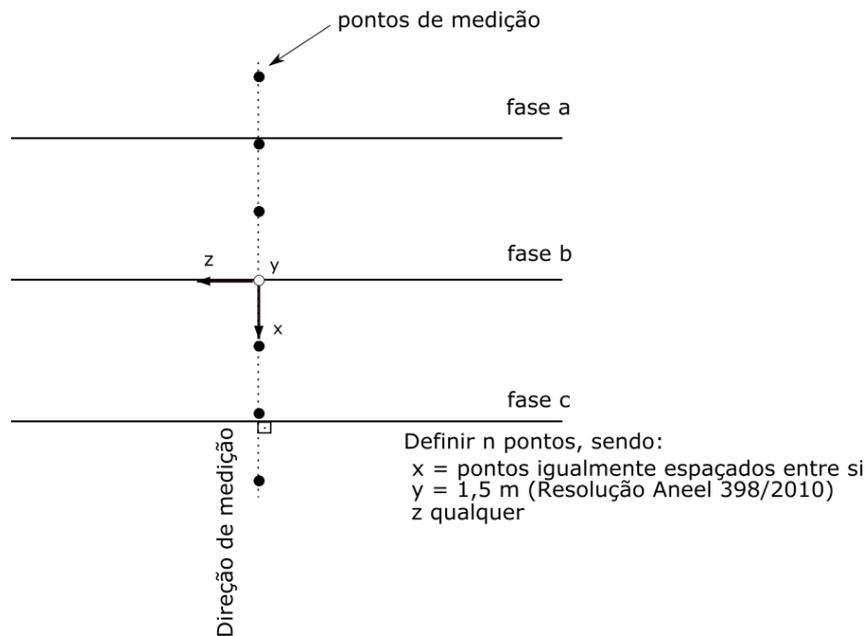


Figura 11 – Marcação de pontos de medição de campos elétrico e magnético sob uma LT de condutores dispostos horizontalmente

espaço livre (*free-body meters*) para o campo elétrico e de indução para o campo magnético. Tais medidores permitem a leitura de valores eficazes dos campos.

Em geral, diversas características dos campos tais como intensidade, análise no domínio da frequência, variação temporal, análise harmônica, dentre outras, podem ser realizadas com os medidores disponíveis no mercado.

A medição deve ser realizada sob a LT, em uma seção transversal desta, a 1,5 m do solo (ANEEL, 2010), em local preferencialmente plano, em pontos horizontais igualmente espaçados entre si, tanto para o campo elétrico quanto para o campo magnético. Para o caso do campo elétrico, o operador deve tomar o cuidado de não interferir na medição. O medidor deve ser fixado sobre tripé eletricamente isolado, com o intuito de reduzir efeitos de proximidade sobre o campo.

Existem diversos tipos de medidores no mercado, alguns incorporam medição de campo elétrico e magnético em um único módulo.

A Figura 11 apresenta a marcação de pontos de medição recomendada para um vão de uma LT trifásica de condutores paralelos.

2.3 Interferências na medição

Se o solo não é perfeitamente plano, em regiões de elevação do terreno, por exemplo, o campo medido será mais intenso que o calculado, e, em regiões de depressão, será menos intenso. A presença de vegetação alta e contígua sobre o solo, como grama alta e sem poda, pode

alterar o nível do solo. A existência de árvores ou construções próximas à LT reduzem significativamente o campo elétrico ao nível do solo ([ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 1982](#)).

O campo magnético não sofre influência de forma significativa da presença de objetos, construções, obstáculos ou do operador ([GUIMARÃES, 2005](#)). Um fator que causa divergência entre os valores medidos e calculados para o campo magnético é a inclinação dos condutores em relação ao solo, notada principalmente próximo à estrutura da torre da LT, tendo em vista a fixação dos condutores a esta, uma vez que se consideram condutores paralelos ao solo ([GUIMARÃES, 2005](#)). A Figura 12 ilustra essa inclinação.

Para evitar a influência de variação da carga da LT nas medições, o tempo de medição deve ser breve ([GUIMARÃES, 2005](#)).

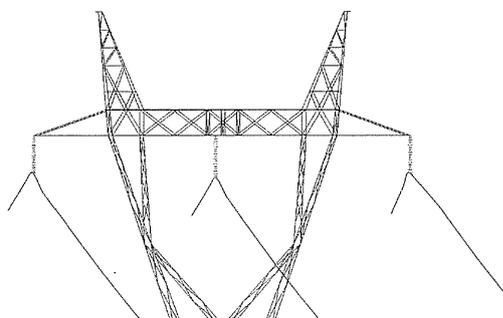


Figura 12 – Inclinação dos condutores na região próxima à torre da LT. *Fonte:* ([GUIMARÃES, 2005](#))

2.4 Importância do monitoramento dos parâmetros geométricos e de carregamento de LTs

2.4.1 Faixa de servidão

A faixa de servidão ou segurança representa a área de entorno da LT, com largura definida, na qual existem restrições de uso e de ocupação do terreno. Essas restrições visam garantir a segurança da operação da LT, bem como das pessoas ou construções localizadas próximas.

Para determinar a largura da faixa de servidão em fase de projeto, devem ser levadas em conta as características do terreno, tipo de torre, classe de tensão, ambiente em que a LT se insere e outros fatores ([SOUZA, 2012](#)).

O respeito ao uso previsto da faixa de servidão tem sido problema para as concessionárias, sobretudo com a expansão urbana no entorno das LTs.

2.4.2 Altura cabo-solo

Uma questão que possui impacto crítico em linhas de transmissão é a altura dos condutores. Conforme se observa da aplicação das expressões de (2.6) a (2.11) para o campo elétrico e de (2.12) a (2.17) para o campo magnético, quanto mais próximos ao solo os condutores, mais intenso o campo ao nível do solo (GUIMARÃES, 2005).

O sistema de transmissão de energia brasileiro é formado em maior parte por LTs com idade média de 30 anos. O crescimento da demanda de energia elétrica no Brasil é constante, e as dificuldades de expansão da rede de transmissão leva os operadores a aumentar o carregamento da LT para atender esta demanda. Esse sobrecarregamento causa efeitos indesejáveis, como o aumento da flecha dos condutores devido ao aquecimento. Por conta do aquecimento, a flecha muitas vezes atinge valores excessivos e a LT acaba violando a distância mínima cabo-solo especificada. O crescimento da flecha resulta em aumento dos campos elétrico e magnético nas proximidades da LT, colocando em risco as pessoas e a própria operação da LT.

Algumas técnicas utilizadas para monitoramento da distância cabo-solo são sensores de corrente e temperatura instalados nos condutores, medição da tensão mecânicas nos cabos e uso de sistemas baseados em sonares(OLIVEIRA, 2000).

Para medições em campo, podem ser trenas ou hipsômetros a laser, por exemplo, mas que nem sempre estão disponíveis dado seu custo relativamente alto.

2.4.3 Distância horizontal entre fases

A aproximação entre as fases além do previsto em projeto pode provocar falha pelo rompimento do isolamento dielétrico existente entre estas. Essas falhas podem ser provocadas principalmente por condições meteorológicas adversas, como fortes ventos, reduzindo as distâncias de isolamento da LT, ou descargas atmosféricas (SANTIAGO; PORTELA, 1991; PINHEIRO, 2005; ROCHA, 2009).

2.4.4 Tensão e corrente de operação

A medição de tensão e corrente em linhas de transmissão são processos indispensáveis e básicos para o controle e monitoramento da operação de LTs, e fornece informações essenciais aos operadores do sistema elétrico. Estas medições são tradicionalmente realizadas por TP, para a tensão, e TC, para as correntes. Essa medição é realizada de forma centralizada, já que estes transformadores se localizam, em geral, nas subestações, ou seja, nas pontas da LT.

Algumas limitações técnicas dessas abordagens, são:

- Resposta em frequência limitada;

- Possibilidade de acoplamento galvânico entre o secundário e os instrumentos de medição, proteção e controle;
- Riscos de explosão;
- Riscos à segurança do operador, principalmente devido curto-circuito no secundário do TP e à abertura de enrolamento secundário no TC;
- Problemas de incompatibilidade magnética;

Esses equipamentos, em geral, são grandes, pesados e caros. Apesar disso e da existência de outras formas de medição (NISHIYAMA et al., 2002; WENDHAUSEN, 2011), os TPs e TCs são amplamente utilizados e possuem melhor precisão.

A tensão pode variar ao longo de pontos da LT, principalmente com a variação da carga, devido à potência reativa. Uma das condições conhecidas é denominado efeito Ferranti, que se caracteriza pela elevação da tensão ao final da LT em condição de carga leve. Por este motivo, a medição em pontos além daqueles em que o TP está conectado à linha pode ser desejado.

A medição da corrente está diretamente associada à segurança da operação da LT, como por exemplo para controle da altura cabo-solo, além de ser importante para sistemas de localização de falhas. Desse modo, sua medição em outros pontos que não o do TC pode, também, ser interessante aos operadores do sistema.

2.5 Considerações Finais

A medição dos campos elétrico e magnético pode representar uma ferramenta auxiliar para a monitoração da linha de determinação de parâmetros.

Assim, é possível associar perfis de campo elétrico e de campo magnético com nível de tensão, nível de corrente, altura dos cabos, distância entre fases, entre outros (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 1982).

A pergunta natural seria como determinar os parâmetros da LT e seu carregamento a partir dos perfis de campo medidos?

Procura-se propor uma forma de responder a esta questão nos capítulos 3 e 4, com a criação de uma ferramenta de análise dos campos medidos.

3 Otimização por Enxame de Partículas

3.1 Inteligência de Enxames

Inteligência de enxames ou inteligência coletiva refere-se, desta maneira, à propriedade de um sistema pela qual o comportamento coletivo de agentes interagindo em um ambiente pode levar à solução de problemas (PARSOPOULOS; VRAHATIS, 2010). Do ponto de vista computacional, é a denominação dada ao conjunto de algoritmos que imitam o comportamento coletivo de colônias de insetos sociais e outras sociedades de animais para a solução distribuída de problemas.

Estudos de enxames de insetos sociais têm resultado em um razoável número de modelos computacionais de inteligência de enxames (PARSOPOULOS; VRAHATIS, 2010; ENGELBRECHT, 2007). Nos enxames biológicos, cada indivíduo têm estrutura relativamente simples, mas comportamento coletivo usualmente complexo, e, geralmente, não é fácil deduzir ou prever o comportamento do enxame a partir de cada indivíduo isoladamente, pois essa ação individual no enxame usualmente não é linear. Apesar de cada indivíduo possuir capacidade de ação muito limitada e de não existir controle central, o enxame possui traços significativos de inteligência, com capacidade de reagir a mudanças no ambiente e de tomar decisões.

Um enxame, portanto, pode ser definido como um grupo de indivíduos que se comunicam uns com os outros, diretamente ou indiretamente, em um determinado ambiente. As interações entre os indivíduos resultam em estratégias coletivas e distributivas de solução de problemas.

Como o indivíduo é influenciado pelo ambiente em que se encontra, seu comportamento e de sua vizinhança podem mudar, afetando o comportamento do enxame como um todo. Dessa forma, o ponto focal da inteligência de enxames é a cooperação ou interação entre seus indivíduos. Essa interação ajuda no refinamento do conhecimento e experiência do ambiente.

Em geral, enxames têm as características de auto-organização, complexidade e descentralização.

Alguns exemplos de enxames na natureza e de sua complexidade são (ENGELBRECHT, 2007):

- Colônias de cupins: estruturas extensas e complexas, muito além da capacidade e da compreensão de um único cupim isoladamente;
- Formigueiro: as tarefas em um formigueiro são alocadas dinamicamente, sem qualquer controle central. Nenhuma formiga é capaz de avaliar as condições ou necessidades glo-

bais do formigueiro, entretanto, todas as tarefas seguem uma organização metódica e o formigueiro se auto-organiza;

- Cardumes de peixes: cada peixe do cardume determina seu comportamento, tal como direção e velocidade de nado, baseado em um pequeno número de peixes vizinhos;

A Figura 13 ilustra algumas manifestações de inteligência de enxames biológicos.



(a) Agrupamento de formigas superando obstáculo em busca de alimento



(b) Revoada sincronizada de pássaros



(c) Arquitetura de cupinzeiro



(d) Organização de cardume de peixes

Figura 13 – Inteligência de enxames biológicos

De um modo geral, podemos entender por enxame uma coleção estruturada de agentes capazes de interagir entre si e com o ambiente (PARSOPOULOS; VRAHATIS, 2010). Assim, a idéia pode ser extrapolada para modelar outros grupos organizados, tais como uma multidão é um enxame cujos agentes são as pessoas, o trânsito é um enxame cujos agentes são os veículos, etc. Essa extrapolação é usada frequentemente nos algoritmos de inteligência de enxames para modelar problemas reais.

Para tentar compreender a coordenação dinâmica de grupos de animais ou insetos sociais, têm sido realizado um grande número de simulações. Reynolds (1987) simulou um bando de pássaros para estudar o voo coordenado apresentado por estes. Para isso, ele modelou os pássaros como partículas. Três comportamentos simples individuais foram estabelecidos para cada partícula que representava um pássaro:

- **Prevenção de colisão:** o objetivo, neste caso, é evitar a colisão com outros pássaros próximos, ou seja, com vizinhos;

- **Igualamento de velocidade:** cada indivíduo iguala sua velocidade à de seus vizinhos. Com isso, pode-se também evitar colisões;
- **Centragem do bando:** cada indivíduo tenta permanecer próximo de seus vizinhos no bando;

Alguns comportamentos emergentes foram observados com a implementação desses comportamentos individuais:

- Os pássaros andam juntos;
- Se deslocam com velocidades semelhantes;
- Não se chocam severamente;

O trabalho de [Reynolds \(1987\)](#) pode ser considerado uma semente do que veio a ser a Otimização por Enxame de Partículas.

3.2 Otimização por Enxame de Partículas

A otimização por enxame de partícula (do termo em inglês *Particle Swarm Optimization* - PSO), é uma técnica desenvolvida por [Kennedy e Eberhart \(1995\)](#) baseada em um modelo psicológico-social de influência e aprendizado e busca simular o comportamento de pássaros em um bando. O PSO tem suas origens no trabalho de [Reynolds \(1987\)](#).

A intenção inicial do trabalho foi simular graficamente a coreografia imprevisível que um bando de pássaros pode descrever, buscando descobrir os padrões que ditam a habilidade dos pássaros de voarem sincronizadamente e de subitamente mudar de direção e se reagruparem em uma formação ótima. Esse conceito evoluiu para um algoritmo de otimização simples e eficiente ([ENGELBRECHT, 2005](#); [ENGELBRECHT, 2007](#)).

3.2.1 Versão Básica do PSO

No PSO, indivíduos denominados partículas “voam” pelo espaço de busca multidimensional, e nesse “voo” ocasionalmente é encontrada uma solução ([ENGELBRECHT, 2007](#)). Indivíduos em um enxame de partículas seguem um comportamento muito simples, que é tentar imitar o sucesso de seus vizinhos. Portanto, mudanças na posição de uma partícula dentro do enxame são influenciadas pela experiência de seus vizinhos, de modo que este comportamento social guia as partículas estocasticamente a regiões promissoras descobertas no espaço de busca. O comportamento coletivo que emerge é capaz de descobrir regiões ótimas em um espaço de busca de alta dimensionalidade ([ENGELBRECHT, 2007](#)).

Para isso, o algoritmo PSO mantém um enxame de partículas, em que cada partícula representa uma solução potencial para o problema. Dessa forma, trata-se de um algoritmo de otimização baseado em população, assim como o algoritmo genético (PARSOPOULOS; VRAHATIS, 2010).

Esse “voo” das partículas é na verdade o seu deslocamento no espaço de busca multi-dimensional ajustado de acordo com sua experiência e com a de seus vizinhos a cada iteração do algoritmo. Denota-se por $x_k(t)$ a posição da partícula k no espaço de busca, na iteração t . A posição da partícula é atualizada por meio da adição da velocidade (que cumpre o papel de um reposicionador da partícula) à sua posição atual (ENGELBRECHT, 2007).

Assim, há duas equações básicas que dirigem o funcionamento do PSO: a atualização de velocidade e a atualização da posição. Como será demonstrado adiante, a topologia do PSO utilizada influenciará em como será atualizada a velocidade.

3.2.1.1 Ajuste de velocidade

Um aspecto importante para determinar a eficiência e precisão do PSO é o balanceamento entre as capacidades de exploração global e de exploração local. Exploração global é definida como sendo a habilidade de um algoritmo em explorar diferentes regiões do espaço de busca a fim de localizar um ponto de boa qualidade. Exploração local, por sua vez, é a habilidade de concentrar a busca ao redor de uma área promissora, ou seja, do ponto encontrado na exploração global, com o objetivo de refinar uma solução candidata (ENGELBRECHT, 2007). Para um bom resultado na otimização, esse balanceamento entre tais habilidades é importante. Para conseguir isso, o PSO trabalha ajustando o tamanho do passo na velocidade da partícula.

3.2.1.2 Topologias de vizinhança social

1. Estrela:

A topologia estrela se caracteriza pela total interconexão do enxame (ENGELBRECHT, 2005). Nela, cada partícula pode se comunicar com qualquer outra diretamente. Do mesmo modo, todas as partículas são atraídas para a melhor solução encontrada pelo enxame até então, a qual é denominada *global best* (*gbest*). Tem como característica a rápida convergência, obtida pelo uso da partícula *gbest* no termo social da equação de atualização da velocidade da partícula. Isso faz com que todas as partículas do enxame sejam direcionadas em poucas iterações para o espaço de busca próximo à partícula *gbest*, o que pode nem sempre ser desejado. Por exemplo, se o ótimo global não está próximo do *gbest* atual, o enxame pode ficar preso nesta região, impossibilitando-o de explorar outras áreas que poderiam ser mais promissoras, ou seja, o enxame pode ficar preso em um mínimo local. O PSO com topologia em estrela, comumente conhecido como *PSO gbest*,

é mais adequado para problemas unimodais (ENGELBRECHT, 2005). O PSO *gbest* será apresentado adiante.

2. Anel:

A topologia em anel se caracteriza pela comunicação direta de uma partícula apenas com partículas de sua vizinhança de tamanho n (ENGELBRECHT, 2007). Se $n = 2$, por exemplo, uma partícula de índice k se comunica somente com seus vizinhos imediatos $k - 1$ e $k + 1$. Do ponto de vista da atualização da velocidade, cada partícula busca imitar o comportamento de seu melhor vizinho, denominado *local best* (*lbest*). Deste modo, a influência da melhor partícula da vizinhança atinge um número limitado de outras partículas, e, assim, a propagação de informações é bem mais lenta. Isso faz com que a convergência do PSO sob essa topologia também seja mais lenta. Contudo, a varredura do espaço de busca é mais ampla que na topologia em estrela, visto que o enxame não está inteiramente concentrado em uma única região, possibilitando soluções de melhor qualidade para problemas multimodais. Deve ser levado em conta, no entanto, que há um gasto computacional extra associado ao cálculo da vizinhança de cada partícula.

3. Árvore ou hierárquica;

A topologia em árvore ou hierárquica organiza-se como uma árvore de n níveis, em que cada nó da árvore corresponde a uma partícula (JANSON; MIDDENDORF, 2005). Nesse modelo, a partícula diretamente acima na árvore influencia a partícula conectada no nó imediatamente abaixo, pois esta utiliza a melhor posição de seu pai (nó ancestral) para ajustar sua velocidade. Se uma partícula descendente encontra uma posição melhor que a sua, o nó pai ajusta seu valor para o de seu descendente como sua melhor posição até o momento. Assim, dinamicamente a vizinhança vai sendo ajustada.

4. Von Neumann:

Nessa topologia, as partículas são interconectadas em uma estrutura de grade em 2 dimensões (ENGELBRECHT, 2005). Cada partícula é conectada a quatro partículas vizinhas (acima, abaixo, à direita e à esquerda) e a melhor partícula, a qual servirá como atratora na atualização da velocidade, é obtida dessa vizinhança. Essa topologia pode ser categorizada como um tipo de *lbest*.

A Figura 14 ilustra as topologias de vizinhança descritas.

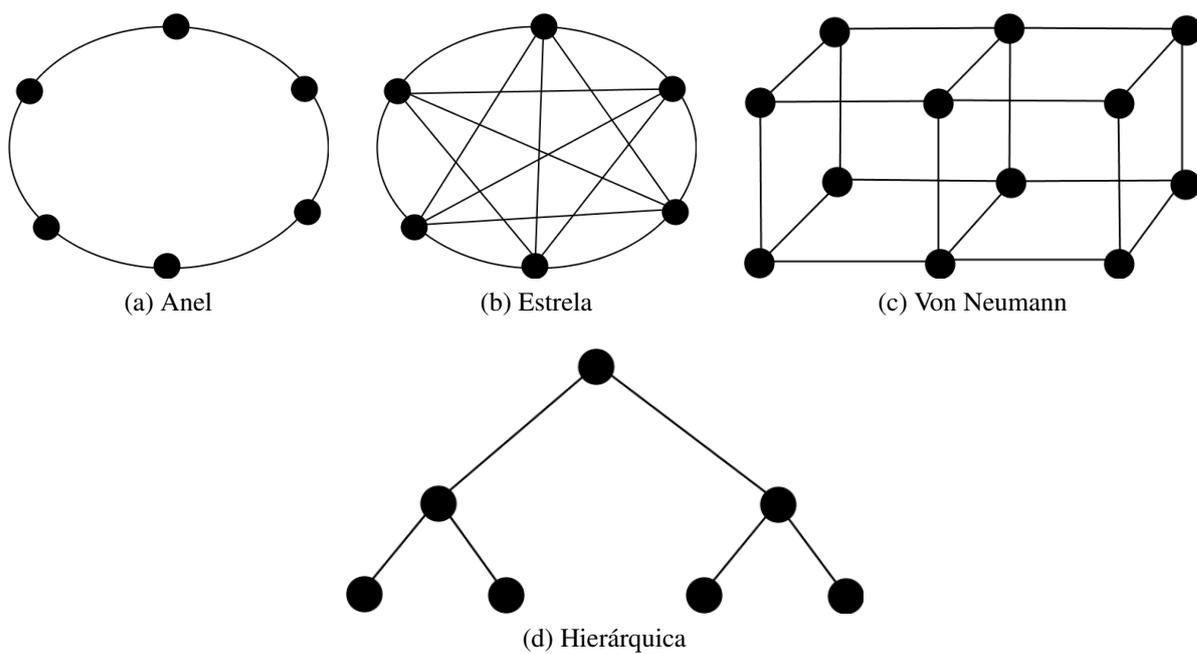


Figura 14 – Algumas topologias de vizinhança do PSO.

3.2.2 Parâmetros básicos do PSO

Os parâmetros básicos do PSO são listados a seguir:

- Tamanho do Enxame

Parâmetro que determina o número total de partículas que compõem o enxame. Quanto maior o enxame, maior a diversidade inicial, porém, o custo computacional também sobe (ENGELBRECHT, 2007). Bergh e Engelbrecht (2001) demonstram empiricamente que um enxame com entre 10 a 20 partículas é eficiente para a maioria dos problemas.

- Tamanho da vizinhança

O tamanho da vizinhança vai depender do tipo de PSO utilizado. Se utilizada a versão PSO *gbest*, a vizinhança é o enxame inteiro. Se utilizado o PSO *lbest*, o tamanho da vizinhança deve ser estabelecido. Vizinhanças menores são mais eficientes na busca de soluções ótimas, mas possuem convergência mais lenta. Por outro lado, vizinhanças maiores promovem uma busca mais ampla, mas são mais susceptíveis a se prenderem a mínimos locais. Uma estratégia é usar tamanho incremental, iniciando com vizinhança pequena e incrementando-a proporcionalmente durante as iterações.

- Condição de parada

Essa condição é totalmente dependente do problema em questão e deve ser ajustada de acordo com o conhecimento prévio sobre os resultados que se desejam encontrar.

- Coeficientes da velocidade

Os coeficientes c_1 e c_2 que aparecem nas equações de atualização de velocidade do PSO controlam a influência que os componentes cognitivo e social exercem sobre a velocidade da partícula. Há vários esquemas utilizados, dentre pré-fixação dos valores a ajuste adaptativo (ENGELBRECHT, 2007).

3.2.3 PSO *gbest*

No PSO *gbest*, a vizinhança de cada partícula é o enxame inteiro. O modelo social empregado reflete a topologia em estrela. Portanto, o componente social da atualização da velocidade da partícula reflete a informação obtida de todas as partículas do enxame, sendo representado pela melhor posição encontrada pelo enxame até o momento (o *gbest*), a qual funciona como uma partícula atratora para as demais.

O PSO *gbest* possui grande capacidade de exploração local, o que a faz convergir rapidamente para a melhor posição local do enxame (que não necessariamente é a posição ótima global), atraindo todas as demais para essa posição. Para alguns tipos de problemas isso pode não ser desejável, pois reduz drasticamente a diversidade do enxame e sua capacidade de

exploração global, levando-o a uma convergência prematura e podendo retê-lo em um mínimo local.

A atualização da velocidade usando o PSO *gbest*, com o peso de inércia w proposto por Shi e Eberhart (1998), é descrita como

$$v_{kl}(t+1) = wv_{kl}(t) + c_1r_{1j}[pbest - x_{kl}(t)] + c_2r_{2j}(t)[gbest - x_{kl}(t)] \quad (3.1)$$

Na qual:

- v_{kl} é a velocidade da partícula k na dimensão $l = 1, 2, \dots, n$ na iteração t ;
- w é o peso de inércia proposto por Shi e Eberhart (1998);
- x_{kl} é a posição da partícula k na dimensão l na iteração t ;
- c_1 e c_2 são, respectivamente, o fator cognitivo e o fator social, os quais são constantes positivas de aceleração usadas para ajustar as contribuições de tais componentes na atualização da velocidade;
- r_{1j} e r_{2j} são valores randômicos obtidos de uma distribuição uniforme no intervalo $[0, 1]$, utilizados para introduzir característica estocástica ao algoritmo;
- *pbest* é a melhor posição visitada pela partícula k até o momento;
- *gbest* é a melhor posição conhecida pelo enxame até o momento.

A atualização da posição da partícula é dada por:

$$x_{kl}(t+1) = x_{kl}(t) + v_{kl}(t+1) \quad (3.2)$$

O peso de inércia tem o papel de regular a velocidade da partícula, evitando a explosão de velocidade (SHI; EBERHART, 1998). Trata-se de um mecanismo que controla o balanceamento entre as capacidades de exploração global e exploração local do enxame. O valor de w é importante para assegurar o comportamento de convergência no PSO quando utilizando-o como estratégia de atualização da velocidade. Altos valores de w facilitam a exploração global, enquanto pequenos valores promovem exploração local. Estratégias iniciais usavam um valor estático durante todo o procedimento de busca do algoritmo, para todas as partículas. Em estudos posteriores, foi proposta a alteração dinâmica do peso de inércia. Em geral, essas abordagens iniciam-no com um valor alto e decrementam-no lentamente durante a execução do algoritmo (ENGELBRECHT, 2007). Algumas estratégias de ajuste de w serão discutidas a seguir.

- Ajuste randômico:

Nessa estratégia, um valor aleatório de w é escolhido a cada iteração.

- Decaimento linear:

Nessa estratégia, w é inicializado com um valor mais alto (tipicamente 0,9) com decaimento linear até um valor pequeno (usualmente 0,4). Muitos trabalhos sugerem a equação (3.3) para atualização de w por decaimento linear.

$$w(t) = [w(0) - w(n_t)] \frac{n_t - t}{n_t} + w(n_t) \quad (3.3)$$

na qual n_t é número máximo de iterações, $w(0)$ e $w(n_t)$ são, respectivamente, os pesos de inércia inicial e final, e $w(t)$ é o peso de inércia na iteração t . É importante que $w(0) > w(n_t)$. Essa equação produz um decaimento linear dependente do tempo.

- Decaimento não-linear:

Valores inicialmente altos decrescem de forma não linear a valores pequenos. Esse método permite um tempo menor de exploração global que o método de decaimento linear, mas permite mais tempo de refinamento de soluções, visto que o período de exploração local é maior que o de exploração global. Esse método pode ser mais apropriado, portanto, para espaços de busca mais restritos. Algumas propostas de decaimento não-linear de w são apresentadas a seguir:

- De [Peram, Veeramachaneni e Mohan \(2003\)](#):

$$w(t+1) = \frac{[w(t) - 0,4](n_t - t)}{n_t + 0,4} \quad (3.4)$$

com $w(0) = 0,9$

- De [Venter e Sobieszczanski-Sobieski \(2003\)](#):

$$w(t+1) = \alpha w(t') \quad (3.5)$$

em que $\alpha = 0,975$, e t' é a iteração em que ocorreu a última mudança do valor do peso de inércia. Nessa estratégia, o peso de inércia somente sofre alteração em seu valor quando não há mudança significativa no valor de *fitness* (função de avaliação) do enxame. Para isso, um subconjunto aleatório de 20% do enxame é escolhido e a sua variação de *fitness* é medida. Se a variação é muito pequena, o valor do peso de inércia é modificado. É atribuído um $w(0) = 1,4$ e $w(n_t) = 0,35$. Com isso, assegura-se uma busca ampla no início, com subsequente refinamento de soluções.

- De [Clerc \(2001\)](#):

$$w_i(t+1) = w(0) + [w(n_t) - w(0)] \frac{e^{m_i(t)} - 1}{e^{m_i(t)} + 1} \quad (3.6)$$

Nessa abordagem, o valor de alteração do peso de inércia depende proporcionalmente da melhoria relativa do enxame. A melhoria relativa do enxame, m_i , pode ser estimada por

$$m_i(t) = \frac{f(lbest(t)) - f(x_i(t))}{f(lbest(t)) + f(x_i(t))} \quad (3.7)$$

na qual f representa a avaliação do *fitness*; $w(n_i) \approx 0,5$ e $w(0) < 1$. Cada partícula tem seu peso de inércia baseado em sua distância da melhor posição local ou melhor posição da vizinhança. A melhor posição local (*lbest*) pode ser substituída pela melhor posição global (*gbest*), se for utilizado o PSO *gbest*.

- Inércia adaptativa *fuzzy*:

O peso de inércia é dinamicamente ajustado de acordo com um conjunto de regras *fuzzy*. Um sistema *fuzzy* de adaptação do peso de inércia, como proposto por Shi e Eberhart (1998), contém os seguintes componentes:

- duas entradas, uma representando o *fitness* da melhor posição global e outra o valor atual do peso de inércia;
- uma saída representando a mudança no valor do peso de inércia;
- três conjuntos *fuzzy*, denominados LOW, MEDIUM e HIGH
- Nove regras *fuzzy* a partir das quais a mudança do valor do peso de inércia é calculada;

- Inércia incremental:

O peso de inércia é linearmente incrementado de 0,4 até 0,9 (ENGELBRECHT, 2007).

As estratégias de ajuste dinâmico do peso de inércia melhoram significativamente o desempenho do PSO, evitando a explosão da velocidade e a convergência precoce. Contudo, tais abordagens nem sempre são efetivas para escapar de mínimos locais, especialmente em problemas complexos, pois, nesses casos, pode haver perda de diversidade depois de algumas iterações.

3.2.3.1 PSO *gbest* com fator de constrição

Para ajuste do balanceamento entre exploração global e exploração local no PSO, foi proposto por Clerc e Kennedy (2002) o uso de um fator de constrição em que a velocidade é restringida por uma constante χ . Quando utilizado o fator de constrição, a equação de atualização da velocidade assume a forma (3.8).

$$v_{kl}(t+1) = \chi[v_{kl}(t) + c_1r_1(pbest - x_{kl}(t)) + c_2r_2(gbest - x_{kl}(t))] \quad (3.8)$$

Na qual

$$\chi = \frac{2k}{\left| 2 - \phi - \sqrt{\phi(\phi - 4)} \right|} \quad (3.9)$$

Nesta última,

$\phi = c_1 + c_2$, $\phi > 4$. Um valor indicado por Clerc e Kennedy (2002) é $\phi = 4,1$, com $c_1 = c_2 = 2,05$ e $k = 1$, que determina $\chi \approx 0,729$.

O fator de constrição evita a explosão da velocidade da partícula, garantindo a convergência se $\phi \geq 4$ e $k \in [0, 1]$, pois a velocidade é reduzida a cada iteração (ENGELBRECHT, 2007). O parâmetro k em (3.9) é responsável pelo balanceamento entre exploração global e local do enxame. Se $k \approx 0$, então há rápida convergência, com exploração local, o que promove uma busca refinada ao redor do ponto conhecido. Por outro lado, se $k \approx 1$, a convergência é mais lenta com um alto grau de exploração global, ou seja, o algoritmo busca novas soluções em outros pontos do espaço de busca. Usualmente, o valor de k é constante, mas há estratégias de decrementá-lo durante as iterações, iniciando com uma alta exploração global e finalizando com maior exploração local, visto que no final da execução espera-se refinar um bom resultado que deve ter sido obtido durante a execução do algoritmo (ENGELBRECHT, 2007).

O PSO com fator de constrição é equivalente ao PSO com peso de inércia (ENGELBRECHT, 2007). Ambas abordagens tem o objetivo de promover o balanceamento entre as capacidades de exploração global e local do enxame.

As diferenças entre as duas abordagens são:

- Não é necessária limitação da velocidade (*velocity clamping*) para o PSO com fator de constrição;
- A convergência é garantida no PSO com fator de constrição, se utilizados os valores recomendados para as constantes que foram citados anteriormente (CLERC; KENNEDY, 2002).
- A regulação da direção das partículas no PSO com fator de constrição é feita pelo ajuste das constantes nos termos $c_1 r_1$ e $c_2 r_2$.

3.2.3.2 O algoritmo básico *PSO gbest*

O algoritmo básico do *PSO gbest* é apresentado a seguir.

Primeiramente, na linha 1, inicializa-se o tamanho do enxame, que é dependente do problema em questão.

Na linha 4 é calculado o *fitness* (ou aptidão) da partícula, o qual irá servir nas linhas 5 e 8 para avaliação da qualidade da partícula em relação ao seu *pbest* e ao *gbest* do enxame. Se a

Algoritmo 1 Algoritmo básico *PSO gbest*

```

1: Inicialize tamanho do enxame
2: enquanto condição de parada não atingida faça
3:   para  $i \leftarrow 1$  até tamanho do enxame faça
4:     Calcule fitness da partícula
5:     se  $f(x_k) < f(pbest)$  então
6:        $pbest \leftarrow x_k$ 
7:     fim se
8:     se  $f(pbest) < f(gbest)$  então
9:        $gbest \leftarrow pbest$ 
10:    fim se
11:    Atualize a velocidade da partícula por (3.1) ou (3.8)
12:    Atualize a posição da partícula por (3.2)
13:  fim para
14: fim enquanto
devolve  $gbest$ 

```

partícula é melhor que um ou outro, então as posições armazenadas nestes são substituídas pela partícula em questão, em cada caso.

Em seguida, nas linhas 11 e 12, a velocidade e posição da partícula são atualizadas usando as equações do PSO básico.

Ao ser atingida a condição de parada, a partícula *gbest* é retornada.

As condições de parada mais comumente utilizadas são:

- Uma solução apropriada foi encontrada;
- Número máximo de iterações atingido;
- Não há melhoria no valor de *gbest* durante um número definido de iterações;

3.2.4 PSO *lbest*

O *PSO lbest*, usa uma topologia de rede social em que vizinhanças de tamanho menor são definidas para cada partícula, como, por exemplo, a topologia em anel (ENGELBRECHT, 2007). O componente social reflete a troca de informação dentro da vizinhança da partícula, exprimindo conhecimento local do ambiente. A contribuição social para a velocidade da partícula, nesse caso, é proporcional à distância entre uma partícula e a melhor posição encontrada em uma vizinhança de partículas, e não mais ao enxame inteiro, como ocorre no modelo *PSO gbest*. A equação de atualização da velocidade, usando o fator de contração, é dada pela expressão a seguir:

$$v_{kl}(t+1) = \chi[v_{kl}(t) + c_1 r_1 (pbest - x_{kl}(t)) + c_2 r_2 (lbest - x_{kl}(t))] \quad (3.10)$$

Na qual:

- v_{kl} é a velocidade da partícula k na dimensão $l = 1, 2, \dots, n$ na iteração t ;
- x_{kl} é a posição da partícula k na dimensão l na iteração t ;
- c_1 e c_2 são, respectivamente, o fator cognitivo e o fator social, os quais são constantes positivas de aceleração usadas para ajustar as contribuições de tais componentes na atualização da velocidade;
- r_1 e r_2 são valores randômicos obtidos de uma distribuição uniforme no intervalo $[0, 1]$, utilizados para introduzir característica estocástica ao algoritmo;
- $pbest$ é a melhor posição visitada pela partícula k até o momento;
- $lbest$ é a melhor posição encontrada em uma vizinhança da partícula k na dimensão l ;

Em (3.10) aparece novamente o fator χ , definido por (3.9). Valem as mesmas observações já feitas para o fator χ .

Assim, $lbest$ é a melhor posição local encontrada pela partícula em uma vizinhança N_k . Em problemas de minimização, $lbest$ pode ser definido por (3.11).

$$lbest(t+1) \in \{N_k | f(lbest(t+1)) = \min[f(x)], \forall x \in N_k\} \quad (3.11)$$

A vizinhança N_k de tamanho n pode ser descrita pelo conjunto (3.12).

$$N_k = \left[pbest_{k-n}(t), pbest_{k-n+1}(t), \dots, pbest_{k-1}(t), pbest_k(t), pbest_{k+1}(t), pbest_{k+n}(t) \right] \quad (3.12)$$

A seleção de vizinhos, nessa estratégia, é baseada em índices das partículas, mas é possível utilizar uma estratégia baseada em similaridade espacial, como distância euclidiana entre partículas (ENGELBRECHT, 2007).

A atualização da posição pode ser encontrada por (3.2).

Nesta seção foi apresentada a equação de atualização da velocidade do *PSO lbest* utilizando o fator de constrição. Contudo, é possível utilizar o peso de inércia substituindo o $gbest$ por $lbest$ em (3.1) (ENGELBRECHT, 2007).

3.2.4.1 O algoritmo básico *PSO lbest*

Como se percebe, o algoritmo básico *PSO lbest* é equivalente ao do *PSO gbest*, a não ser pela substituição do $gbest$ pelo $lbest$. A partícula $lbest$ é determinada como definido na seção 3.2.4.

Algoritmo 2 Algoritmo básico *PSO lbest*

```

1: Inicialize tamanho do enxame
2: enquanto condição de parada não atingida faça
3:   para  $i \leftarrow 1$  até tamanho do enxame faça
4:     Calcule fitness da partícula
5:     se  $f(x_k) < f(pbest)$  então
6:        $pbest \leftarrow x_k$ 
7:     fim se
8:     se  $f(pbest) < f(lbest)$  então
9:        $lbest \leftarrow pbest$ 
10:    fim se
11:    Atualize a velocidade da partícula por (3.10)
12:    Atualize a posição da partícula por (3.2)
13:  fim para
14: fim enquanto
devolve O melhor lbest

```

3.3 Variações da versão básica do PSO

Nesta seção, são apresentadas algumas variações propostas do algoritmo básico PSO. Todas buscam superar algumas deficiências do algoritmo básico, como a convergência precoce e a facilidade em ficar presa a mínimos locais.

Buscou-se um sucinto relato de algumas variações importantes do PSO, sem o intuito de uma citação extensa de todas as variações atualmente consolidadas.

3.3.1 Fully Informed Particle Swarm Optimization (FIPS)

O PSO totalmente informado, ou FIPS, foi proposto por [Mendes, Kennedy e Neves \(2004\)](#). No FIPS, cada partícula k é atraída para as melhores posições de todas as partículas em sua vizinhança, e a atualização de velocidade da partícula é realizada levando em conta as informações de todos os vizinhos de cada partícula. O desempenho do algoritmo está intrinsecamente ligado à topologia utilizada, tendo, portanto, impacto crítico no comportamento do algoritmo.

A atualização da velocidade no FIPS é dada por

$$v_{kl}(t+1) = \chi \left[v_{kl}(t) + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N r (P_{V_k(n),j} - x_{kl}(t)) \right] \quad (3.13)$$

Na qual,

- χ é o fator de constrição proposto por [Clerc e Kennedy \(2002\)](#);
- N é o número de partículas na vizinhança da partícula k ;

- r é um número aleatório de uma distribuição uniforme no intervalo $[0, \phi]$, onde ϕ é chamado coeficiente de aceleração;
- $V_k(n)$ é uma função que retorna o índice do n -ésimo vizinho da partícula k ;
- $P_{V_k(n),j}$ é o j -ésimo componente da melhor posição atual do n -ésimo vizinho de k ;

Estudos demonstraram que quando uma topologia totalmente conectada é utilizada, o desempenho do FIPS é ruim (OCA; STUTZLE, 2004). Isso em parte pode ser explicado porque a múltipla influência da vizinhança sobre uma partícula pode induzir um comportamento aleatório ao enxame, e a partícula pode ficar “confusa” ao atualizar sua velocidade. Assim, o desempenho final do algoritmo depende da topografia da função objetivo.

Outra desvantagem do FIPS é que ele não considera o fato de que as múltiplas influências entre as partículas podem cancelar umas às outras, levando o algoritmo à estagnação precoce (OCA; STUTZLE, 2004). Isso pode acontecer, por exemplo, quando todos os vizinhos de uma partículas estão organizados de forma aproximadamente simétrica em relação à partícula em questão, o que pode surgir após algumas iterações do FIPS.

3.3.2 Garanted Convergence Particle Swarm Optimization (GCPSO)

Uma propriedade da versão básica do PSO é que se $x_k = y_k = gbest$, o que quer dizer que a partícula k se encontra na melhor posição conhecida pela partícula e pelo enxame até o momento, ou seja, o melhor ponto conhecido do espaço de busca até então, a atualização da velocidade da partícula torna-se totalmente dependente apenas do termo de inércia $wv_k(t)$. Se essa condição ocorre para todas as partículas e persiste por um número razoável de iterações, pode levar à estagnação da busca, pois wv_k tende a zero. Uma pequena alteração no PSO padrão foi proposta por Bergh e Engelbrecht (2002) visando a solução deste problema, em que a equação de atualização da velocidade é alterada para forçar que a melhor partícula global mude para uma posição melhor, evitando assim a estagnação do enxame. É importante observar que todas as demais partículas permanecem sendo atualizadas pelas equações originais do PSO, e somente a melhor partícula global sofre a alteração de atualização sugerida pelo GCPSO.

Chamando de θ o índice da melhor partícula global, temos que

$$pbest_{\theta} = gbest \quad (3.14)$$

A nova forma de atualização da posição da melhor partícula global é então dada por

$$x_{\theta l}(t+1) = gbest_l(t) + wv_{\theta l}(t) + \rho(t)(1 - 2r_2(t)) \quad (3.15)$$

E a sua velocidade é atualizada por

$$v_{\theta j}(t+1) = -x_{\theta j}(t) + gbest_j(t) + wv_{\theta j}(t) + \rho(t)(1 - 2r_{2j}(t)) \quad (3.16)$$

Onde $\rho(t)$ é um fator de escala que controla o diâmetro da área de busca conforme

$$\rho(t+1) = \begin{cases} 2\rho(t), & \text{se } \#sucessos(t) > s_c \\ 0,5\rho(t), & \text{se } \#falhas(t) > f_c \\ \rho(t), & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.17)$$

Nas quais

- $\#sucessos(t)$ e $\#falhas(t)$ denotam, respectivamente, os números de sucessos e falhas consecutivos na busca de minimizar a função objetivo.
- s_c e f_c são os limiares desses contadores, respectivamente. Alguns valores iniciais para esses limiares são $s_c = 15$ e $f_c = 5$ (ENGELBRECHT, 2007).

Quando o contador $\#sucessos$ ultrapassa o limiar, a área de pesquisa ao redor da melhor posição é ampliada, por meio da duplicação de $\rho(t)$. De outro modo, sempre que o contador $\#falhas(t)$ excede o limite de falhas, a área de pesquisa precisa ser reduzida, o que é feito com $\rho(t+1) = 0,5\rho(t)$. Toda vez que um dos limites são ultrapassados, o limiar que foi excedido é incrementado. A cada iteração em que a melhor posição atual consegue ser melhorada, incrementa-se o contador de sucessos e zera-se o contador de fracassos, e vice-versa.

O GCPSO é adequado a problemas unimodais, garantindo a convergência para um ótimo local. No entanto, não há garantia de convergência para um ótimo global, e o algoritmo não produz resultados significativamente melhores que o PSO versão básica quando usado em problemas multimodais (PARSOPOULOS; VRAHATIS, 2010). A principal limitação do GCPSO é a necessária informação prévia sobre o problema para estabelecimento do valor do fator de escala ρ , o que nem sempre é possível.

3.3.3 Cooperative Particle Swarm Optimization (CPSO)

A idéia do Cooperative Particle Swarm Optimization (CPSO) foi desenvolvida por Bergh e Engelbrecht (2004). A modificação sugerida é que ao invés de utilizar um único enxame, o CPSO utiliza n subenxames de tamanho N . A cooperação pode ser entendida como sendo a interação entre indivíduos para a troca de informações que possam melhorar seus resultados durante o processo de otimização.

A abordagem baseia-se em dividir o espaço solução em subespaços, em que cada subespaço é otimizado por um subenxame. Dessa forma, o vetor solução global é construído a partir das soluções parciais encontradas pela melhor partícula de cada subenxame. A idéia central do CPSO é apresentada na Figura 15.

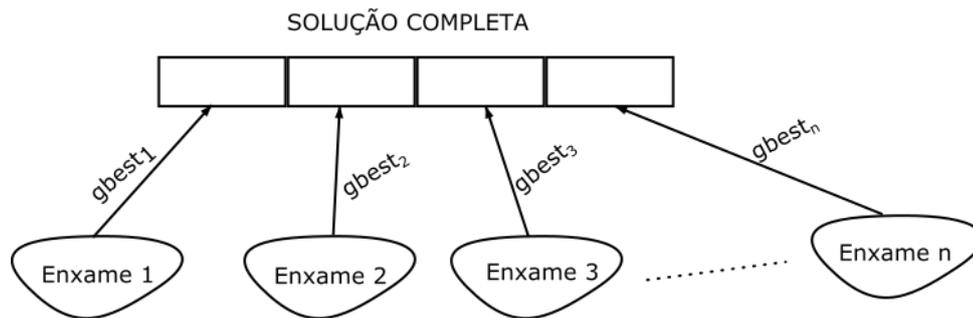


Figura 15 – Construção de solução no CPSO

3.3.4 Niching Particle Swarm Optimization (NPSO)

O algoritmo NPSO foi proposto por Brits, Engelbrecht e Bergh (2002) como uma variação do PSO capaz de localizar muitas soluções de um problema, simultaneamente, ou seja, apropriado para problemas de otimização multimodal.

A idéia de nichos é também aplicada em algoritmos genéticos e faz analogia com ecossistemas naturais, que são compostos de diferentes espaços físicos que permitem a formação e a manutenção de espécies competindo pela sobrevivência. Em cada nicho, os recursos são finitos e devem ser compartilhados entre seus indivíduos. Analogamente, os nichos promovem diversidade genética, pois surgem várias diferentes subpopulações com características otimizadas (as espécies).

No NPSO, cada subenxame mantém um nicho. A troca de informações somente é permitida dentro do subenxame, não havendo troca de informações entre subenxames, o que propicia a manutenção de nichos de resultados, ou seja, soluções encontradas de forma totalmente independentes umas das outras e com características possivelmente diferentes.

O NPSO inicia com único enxame, denominado enxame principal, o qual contém todas as partículas. Assim que uma partícula converge para uma potencial solução do problema, um subenxame é criado pelo agrupamento de partículas que estão próximas à potencial solução. Essas partículas são então removidas do enxame principal e continuam dentro de seu subenxame a refinar a solução. O processo é realizado repetidamente, e a convergência ocorre quando nenhum subenxame consegue melhorar as soluções que ele representa.

3.3.5 PSO Multi-Ring

O PSO Multi-Ring foi proposto por Bastos-Filho et al. (2008) e possui clara inspiração em uma topologia de vizinhança local do tipo Von Neumann. Usando uma estrutura baseada em múltiplos anéis interligados, essa proposta faz uso de um mecanismo de diversidade provido por rotações nos anéis, com o intuito de melhorar a exploração do espaço de busca. Na estrutura de anéis do PSO Multi-Ring, uma partícula se comunica com seus vizinhos diretos, isto é, a comunicação é local. A Figura 16 ilustra a topologia.

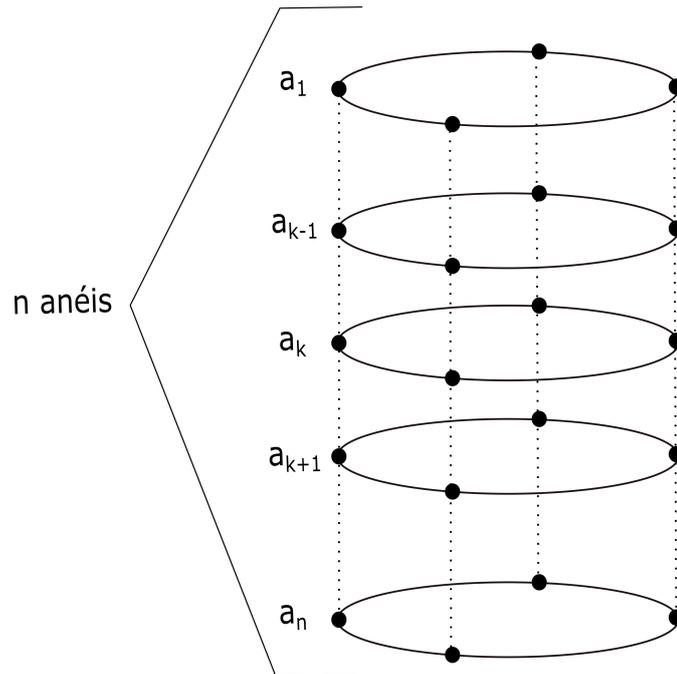


Figura 16 – Topologia do PSO Multi-Ring. Os pontos representam as partículas e o tracejado a interconexão entre elas. *Fonte:* adaptada de (BASTOS-FILHO et al., 2008)

Esta pode ser descrita como um conjunto de n anéis interligados. Uma partícula qualquer, em um anel a de índice k , tem sua posição dada por $a^{(k)}(i)$, em que i é a posição da partícula no anel k . Cada anel é formado por um mesmo número de partículas. A vizinhança de uma partícula P qualquer pode ser obtida por

$$N_P = \{a^{(k)}(i-1), a^{(k)}(i+1), a^{(k-1)}(i), a^{(k+1)}(i)\} \quad (3.18)$$

É importante observar que o primeiro e último anéis possuem vizinhança limitada, uma vez que estes têm somente um anel conectado a eles.

3.3.5.1 Troca de informações na topologia PSO Multi-Ring

No PSO, a estratégia de troca de informações no enxame é peça chave para o desempenho do algoritmo, visto ser um modelo sociológico em que o conhecimento que se tem do ambiente e dos demais membros é crucial para a partícula construir sua própria percepção do problema. Por exemplo, na estratégia de troca global de informações provida pelo *PSO gbest*, cada partícula instantaneamente sabe qual é a melhor posição global a cada iteração (ou seja, a partícula *gbest*). Desse modo, todas as partículas assumem novas posições em regiões do espaço de busca relacionadas à mesma melhor posição global, o que reduz a capacidade de exploração do enxame a esta região somente. A idéia da troca de informação global propiciada pela estratégia *gbest* pode ser contraposta a um modelo de troca local, em que a informação é difundida inicialmente somente em uma vizinhança da partícula, e assim sucessivamente até o restante das demais vizinhanças. Essa troca mais lenta de informações propicia melhor balanceamento entre

as capacidades de exploração global e local, mas requer um tempo maior de processamento, o que tem que ser levado em conta dependendo do problema.

No PSO Multi-Ring, uma partícula que pertença a um anel $a_{(k)}$ (caso este não esteja o último ou o primeiro anéis) troca informações com partículas vizinhas nos anéis $a_{(k+1)}$ e $a_{(k-1)}$, a fim de obter as informações sociais que são conhecidas pelos outros anéis, bem como transmitir sua prévia experiência às demais. Se a partícula trocasse informações sempre com a mesma vizinhança, a topologia se assemelharia a uma topologia local estática do tipo Von Neumann. No entanto, há um elemento de dinamicidade na vizinhança e na troca de informações que a diferencia de uma abordagem tradicional *lbest*, que é a rotação do anel, a qual será apresentada na próxima seção.

O PSO Multi-Ring sugere obter os benefícios de uma topologia local, como resultados mais precisos e capacidade de evitar convergência precoce, associado a convergência mais rápida em relação a outras estratégias de topologia local. (BASTOS-FILHO et al., 2008).

3.3.5.2 Ferramenta de rotação do anel (*Ring Layer Rotation Skill*)

Em problemas não lineares multimodais, os quais podem ter muitas regiões de mínimos locais, o PSO pode ficar preso nessas regiões durante sua execução. Caso o ótimo global esteja em outro ponto do espaço de busca distante do ponto de mínimo em que o algoritmo ficou preso, pode ser que nunca seja alcançado, caso não se melhore sua capacidade de exploração global. Com o intuito de evitar essa condição, é sugerida no PSO Multi-Ring uma estratégia denominada rotação do anel (BASTOS-FILHO et al., 2008).

Essa estratégia consiste em rotacionar as posições das partículas no anel, o que provoca alteração na vizinhança de todas elas e dos anéis interligados, implicando na alteração da informação a ser propagada. Isso resulta em modificação na região de busca do enxame, movendo-a de uma região para outra, melhorando a capacidade de exploração, pois novas posições no espaço de busca poderão ser atingidas e pesquisadas.

Cada anel guarda memória da melhor posição encontrada por este até o momento, denominada *ringbest*. Caso um anel permaneça sem melhorar seu *ringbest* por um determinado número de iterações, a rotação é disparada, e cada partícula tem seu índice no anel alterado para

$$i' = (i + d) \bmod (np) \quad (3.19)$$

na qual d é a distância de rotação e np é o número de partículas do anel.

Com isso, o valor de *ringbest* pode ser melhorado, visto a alteração na vizinhança da própria partícula e dos anéis interligados, tendo como consequência melhoria da convergência do algoritmo que estava estagnado.

Para uma partícula P qualquer do anel, colocada no nó de índice i , temos que antes da rotação sua vizinhança era definida pelo conjunto (3.18). Após a rotação, a nova vizinhança é

dada por

$$N_{r_p} = \{a_{(k)(i'-1)}, a_{(k)(i'+1)}, a_{(k-1)(i')}, a_{(k+1)(i')}\} \quad (3.20)$$

na qual i' é dado por (3.19).

Como exemplo, observa-se na Figura 17 que a partícula P_J , antes da rotação, estava posicionada no índice $i = 1$ de seu anel e possuía o conjunto de vizinhos $N_{P_J} = \{P_K, P_M, P_F, P_N\}$.

Após a rotação com $d = 1$, a partícula P_J agora está posicionada no índice $i = 2$ de seu anel e seu conjunto de vizinhos foi alterado para $N_{r_{P_J}} = \{P_K, P_M, P_G, P_O\}$.

Pode-se perceber que a rotação provoca também a alteração da vizinhança para as partículas em anéis interligados ao anel rotacionado, modificando o conhecimento social das partículas desses anéis, o que tem impacto na informação disseminada ao restante do enxame.

Uma questão a ser resolvida é o limiar de disparo da rotação do anel.

Ao atingir um certo número definido de iterações sem que o anel consiga melhorar seu *ringbest*, denominado t_r , a rotação é disparada e o contador de verificação do valor de *ringbest* é reiniciado.

Definir um bom valor de t_r é um ponto importante para o desempenho do PSO Multi-Ring (BASTOS-FILHO et al., 2008). Em uma análise inicial, acredita-se que um t_r pequeno demais pode desviar precocemente a busca de uma área que poderia ser promissora para uma área menos interessante. Por outro lado, um t_r alto pode decrementar a capacidade de exploração, posto que a busca pode permanecer por mais tempo em uma região pouco promissora e o resultado final pode ser afetado. Um valor de $t_r = 20$ é sugerido como referência para bons resultados (BASTOS-FILHO et al., 2008).

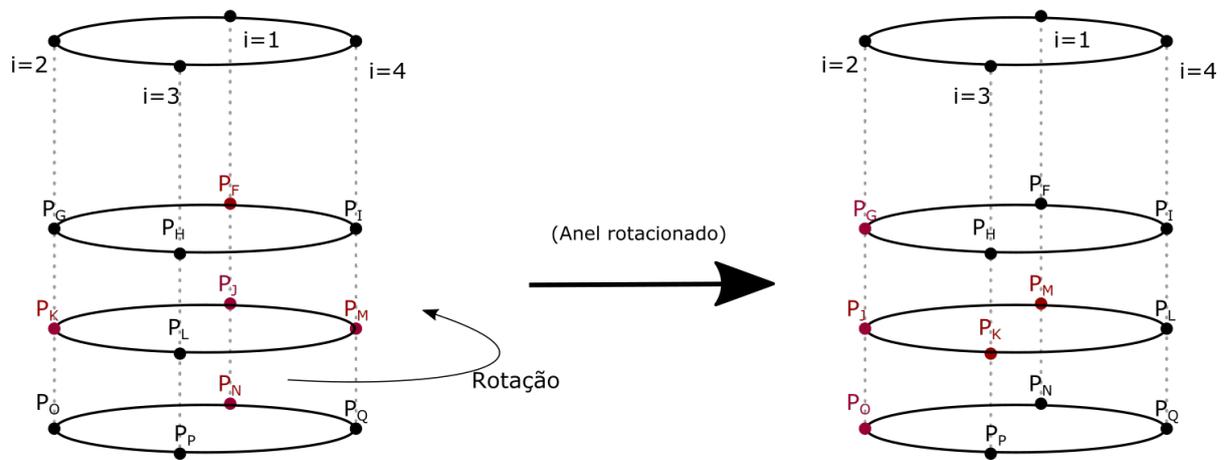


Figura 17 – Rotação do anel no PSO Multi-Ring (Fonte: adaptada de (BASTOS-FILHO et al., 2008))

3.3.5.3 O algoritmo PSO Multi-Ring

O algoritmo PSO Multi-Ring é apresentado a seguir.

Algoritmo 3 Algoritmo PSO Multi-Ring

- 1: Inicialize $num_de_aneis_aneis$, $num_particulas_anel$, $melhor_fitness_da_vizinhança$, $melhor_posicao_da_vizinhança$, $ringbest$, $best_ringbest$ e parâmetros gerais do PSO
 - 2: **enquanto** condição de parada não atingida **faça**
 - 3: **para** $i \leftarrow 1$ **até** num_de_aneis **faça**
 - 4: rotacione o anel
 - 5: **para** $j \leftarrow 1$ **até** $num_particulas_anel$ **faça**
 - 6: Atualize velocidade da partícula
 - 7: Atualize posição da partícula
 - 8: Calcule $novo_fitness$ da partícula ▷ Calcula a aptidão da partícula
 - 9: **se** $novo_fitness < pbest$ **então** ▷ Atualiza o pbest
 - 10: $pbest \leftarrow novo_fitness$
 - 11: **fim se**
 - 12: **se** $novo_fitness < melhor_fitness_da_vizinhança$ **então**
 - 13: $melhor_fitness_da_vizinhança \leftarrow novo_fitness$
 - 14: $melhor_posicao_da_vizinhança \leftarrow posição_da_partícula$
 - 15: **fim se**
 - 16: **fim para**
 - 17: Defina o $ringbest$ ▷ Determina a melhor partícula do ring
 - 18: **fim para**
 - 19: Defina o $best_ringbest$ ▷ Escolhe o melhor ringbest
 - 20: **fim enquanto**
- devolve** $best_ringbest$
-

Primeiramente, na linha 1, ocorre a inicialização de variáveis. A primeira que deve ser

estabelecida é o tamanho do enxame. O número de anéis é definido levando em conta o tamanho do enxame e o número de partículas no anel (os anéis devem todos possuir o mesmo número de partículas). O número de partículas no anel deve ser escolhido tal que seja um múltiplo inteiro do tamanho do enxame, pois todos os anéis devem ter o mesmo tamanho. O número de anéis pode ser calculado por (3.21).

$$\text{num_de_aneis} = \left\lfloor \frac{\text{tam_enxame}}{\text{num_particulas_anel}} \right\rfloor, \text{ com resto zero.} \quad (3.21)$$

Em seguida, *melhor_fitness_da_vizinhança* é inicializada para cada partícula, com um valor de aptidão que seja o pior possível para o caso em questão, pois este valor deve ser obrigatoriamente atualizado na primeira iteração do algoritmo, e, do mesmo modo, para cada partícula, *melhor_posicao_da_vizinhança*. Uma sugestão é que seja atribuído a essas variáveis os valores correspondentes da pior partícula do enxame. Para as variáveis *ringbest* e *best_ringbest* pode ser seguida a mesma orientação quanto à inicialização com os valores da pior partícula do enxame, considerando que há um valor de *ringbest* para cada anel e apenas um valor de *best_ringbest* para todo o algoritmo.

Na linha 2 deve ser estipulada a condição de parada de acordo com o problema em questão. A linha 3, inicia-se um conjunto de ações para cada anel. Primeiramente, há rotação do anel na linha 4. Em seguida, para cada partícula do anel, são atualizadas a velocidade e a posição da partícula, é calculado o *fitness* da partícula, e são atualizados o seu *pbest*, a melhor partícula da vizinhança e o melhor *fitness* da vizinhança, o que pode ser visto nas linhas 5 a 16.

O melhor *fitness* da vizinhança e melhor partícula da vizinhança são informações sociais usadas pelo PSO Multi-Ring para atualizar sua velocidade. Nesse caso, a atualização da velocidade na linha 6 utiliza o valor em *melhor_posição_da_vizinhança* em substituição ao *lbest* na expressão (3.10) para calcular a velocidade da partícula. A posição da partícula na linha 7 pode ser atualizada com a expressão (3.2).

Na linha 17, a melhor partícula do anel é escolhida como *ringbest*, que tem seu valor atualizado a cada iteração.

Na linha 19, a melhor partícula dentre todos os *ringbest* é escolhida como a melhor de todos os rings, ou seja, *best_ringbest*. Desse modo, *best_ringbest* representa o melhor valor global encontrando pelo algoritmo.

3.4 Considerações finais

Este capítulo tratou da otimização por enxame de partículas e abordou aspectos teóricos e filosóficos sobre o método.

No próximo capítulo é apresentada a metodologia que busca aplicar o PSO Multi-Ring ao problema das LTs identificado no capítulo 2, qual seja, encontrar os parâmetros da LT a partir

das curvas medidas de campo elétrico e de campo magnético.

4 Metodologia proposta para estimação de parâmetros de LTs

O presente capítulo propõe a aplicação do PSO Multi-ring para estimar parâmetros geométricos e o carregamento das linhas, com base nas medições dos campos elétrico e magnético numa seção transversal da LT.

Serão estimados parâmetros geométricos e de carga, que, apesar de não proporcionarem uma análise completa da operação da LT, fornecem uma boa visão de aspectos básicos que afetam sua operação. Esses parâmetros são:

1. Corrente;
2. Tensão;
3. Altura cabo-solo;
4. Distância horizontal entre os condutores fase;
5. Diâmetro equivalente dos condutores.

Doravante, quando se fizer alusão a “parâmetros da LT” estar-se-á referindo-se aos elencados acima. A importância destes no monitoramento de LTs foi apresentada na seção 2.4, do Capítulo 2.

4.1 Definição do problema de estimação de parâmetros de uma LT e modelagem proposta

Os campos elétrico e magnético em um ponto (x, y) de uma seção transversal de uma LT trifásica de condutores paralelos podem ser calculados, respectivamente, usando as equações de Potencial de Maxwell, dadas pelas expressões (2.2) a (2.11), e a Lei de Bio-Savart, expressa por (2.12) a (2.17). Para os cálculos, devem ser fornecidos alguns parâmetros básicos.

No caso do campo elétrico é necessário:

1. Tensão eficaz nominal da LT;
2. Altura cabo-solo de cada fase;
3. Distância entre os condutores fase;

4. Número de subcondutores em cada fase;
5. Diâmetro de cada subcondutor;
6. Espaçamento entre os subcondutores de cada fase.

Para o campo magnético é necessário:

1. Corrente eficaz nas fases;
2. Altura cabo-solo de cada fase;
3. Distância horizontal entre os condutores fase.

Uma questão importante é: dadas as curvas de campo elétrico e magnético obtidas para uma certa LT, é possível estimar os parâmetros geométricos e de carga da linha?

O problema de descoberta dos parâmetros de uma LT a partir de seus campos elétrico e magnético, utilizando as equações de Potencial de Maxwell e Lei de Bio-Savart, respectivamente, pode ser modelado como um problema de otimização proposto na expressão (4.1), cujo resultado é a estimação dos parâmetros da LT.

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \quad Z(X) = e(X) + b(X) \\ [htb] & \text{sujeito a:} \quad lf_i \leq X_i \leq ls_i, \quad i = 1, \dots, n. \\ & \quad \quad \quad X \in R \end{aligned} \tag{4.1}$$

na qual X é o vetor de variáveis de decisão; $e(X)$ é o erro do campo elétrico simulado da partícula X em relação ao campo elétrico medido; $b(X)$ é o erro da densidade de fluxo magnético simulada para a partícula X em relação à densidade de fluxo magnético medida; X_i , com $i = (1, 2, \dots, n)$ representa cada variável de decisão do vetor X ; lf_i e ls_i são os limites inferior e superior, respectivamente, da variável X_i .

Denomina-se estimação porque os parâmetros obtidos no processo de otimização se aproximam dos valores reais, com certo erro.

As funções objetivo serão detalhadas adiante, na seção 4.4.2.

Define-se, também, um espaço S , denominado de espaço viável ou factível, tal que:

$$S = \{X \mid lf_i \leq X_i \leq ls_i, \text{ com } i = (1, 2, \dots, n), \text{ e } X \in R\} \tag{4.2}$$

As soluções desejadas são as localizadas em S , pois representam soluções adequadas para o problema, e a(s) solução(ões) ótima(s) se encontra(m) também nesse espaço.

Metaheurísticas são algoritmos de propósito geral que podem ser aplicados para tratar vasta gama de problemas de otimização. Permitem resolver problemas de grande complexidade

com soluções de boa qualidade e em tempo razoável, embora não haja, a princípio, garantias quanto a encontrar o ótimo global. Seu uso tem aumentado em várias aplicações, inclusive de engenharia, e tem mostrado sua eficiência e eficácia em problemas de difícil solução (TALBI, 2009).

Dentre as metaheurísticas destaca-se PSO, por sua facilidade de implementação, adequação a problemas de otimização contínua e robustez. A variação PSO Multi-Ring será aplicada para solução do problema de otimização apresentado.

4.2 Visão geral do método estimação de parâmetros de LT por meio de otimização, com base nos campos elétrico e magnético

O método proposto baseia-se em dois pontos principais: medição dos campos elétricos e magnéticos de uma LT e uso de um método de otimização para solução do problema de otimização subjacente, apresentado na seção 4.1, por meio do PSO Multi-Ring.

A visão geral é ilustrada na Figura 18.



Figura 18 – Visão geral do método de estimação de parâmetros de LT por meio de otimização com PSO Multi-Ring.

Os passos para sua execução são descritos a seguir:

1. Escolhe-se o local e determina-se o número de pontos de medição em uma seção transversal de uma LT, em toda a extensão de sua faixa de servidão. O esquema de determinação desses pontos é apresentado na Figura 11, na seção 2.2.1;
2. Realizam-se as medições dos campos elétrico e magnético originados pela LT nesses pontos. Cada ponto pode ser representado por suas coordenadas (x, y) , sendo x a distância horizontal em relação à fase central, com esta posicionada na origem do eixo x , e $y = 1,5$ m a altura, que é a mesma para todos os pontos. Os campos medidos serão denominados campos de referência, pois serão referenciais para o processo de otimização. Os valores dessas medições são incluídos em uma rotina computacional (PSO Multi-Ring);
3. Aplica-se o PSO Multi-Ring para gerar partículas que representem parâmetros estimados da LT, e calculam-se os campos elétrico e magnético que essas partículas geram em cada

um dos pontos de verificação, usando as equações de Potencial de Maxwell, (2.2) a (2.11), e Lei de Biot-Savart, (2.12) a (2.17). Essa etapa é chamada de simulação, e os campos são denominados, por convenção, campos simulados;

4. Calcula-se o erro da partícula pela comparação de seus campos simulados com os campos de referência, de acordo com o disposto na seção 4.4.2, adiante. Calcula-se a aptidão da partícula;
5. Utiliza-se o PSO Multi-Ring para atualizar as partículas a cada iteração, determinando a melhor (mais apta) do enxame, até que o número máximo de iterações ou o erro mínimo estipulado seja atingido;
6. Retornam-se os parâmetros representados pela melhor partícula, e o processo de otimização está concluído;
7. Comparam-se os parâmetros obtidos na simulação com os reais, quando disponíveis.

O fluxo de execução proposto é apresentada na Figura 19.

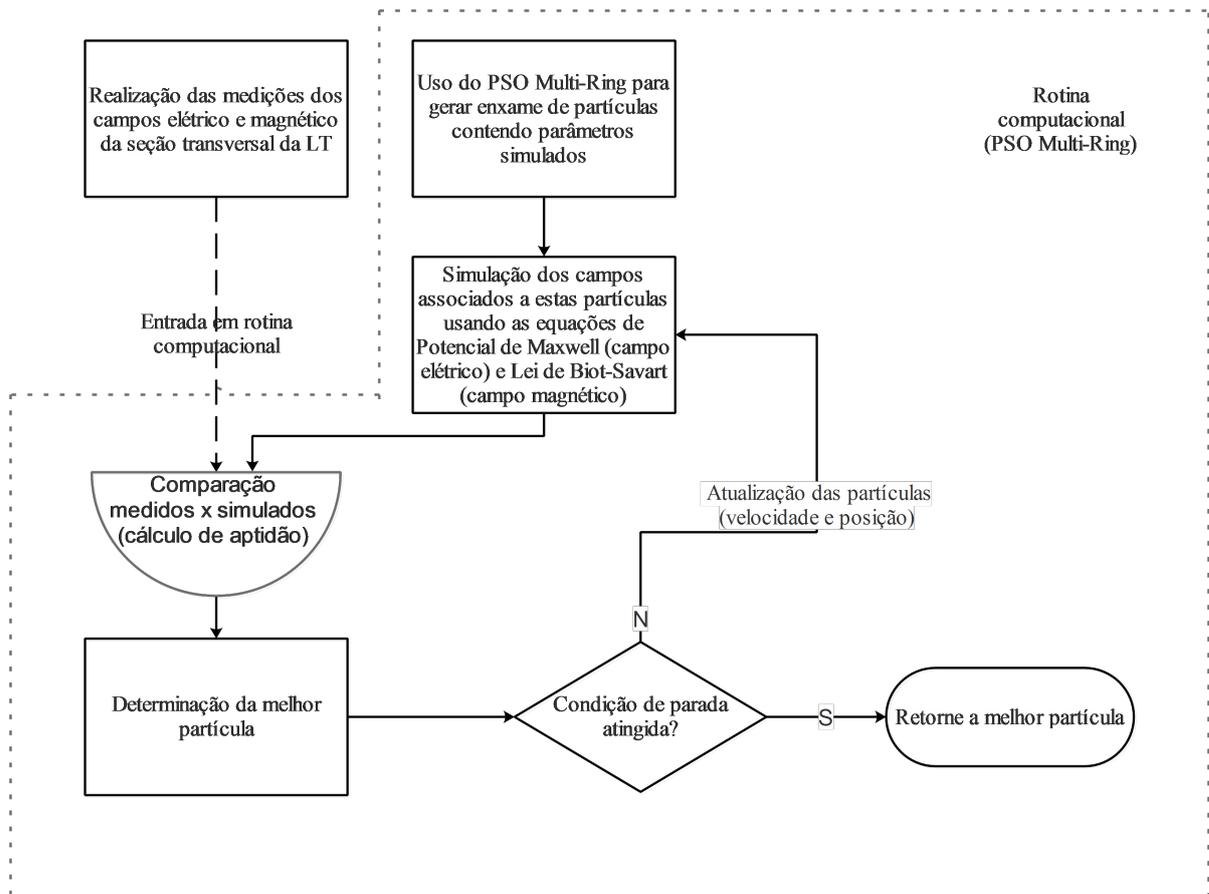


Figura 19 – Fluxo de execução do método de estimação de parâmetros de LT por meio de otimização com PSO Multi-Ring.

4.3 Observações sobre as medições dos campos elétrico e magnético das LTs utilizadas na aplicação do método

Com o objetivo de ter-se medidas que retratem corretamente os campos elétrico e magnético da LT a ser analisada, primeiramente deve-se buscar um local adequado e que ofereça condições o mais próximas possível das ideais.

Em relação aos locais e condições de medição, deve-se ter em mente cuidados com o intuito de evitar interferência nas medições, como os citados a seguir:

1. Evitar a presença de outras fontes de campos elétricos e magnéticos próximos à linha a ser medida, especialmente na faixa frequência de 60 Hz, faixa de operação da maior parte das LTs no Brasil.
2. Procurar locações de terreno plano para que a variação de topografia não interfira significativamente nas medições.
3. Procurar locações em que os condutores estejam alinhados entre si e com o solo, pois a inclinação pode interferir nos resultados.

Foram efetuadas as medições dos campos elétrico e magnético em duas locações na região metropolitana de Goiânia. Estas locações foram obtidas por contatos realizados junto à concessionária, e as medições autorizadas e acompanhadas pela equipe responsável.

Por medidas de sigilo, estas locações serão denominadas LT 01 e LT 02 e descritas no Capítulo 5.

4.4 PSO Multi-Ring aplicado à estimação de parâmetros de LTs

Para a aplicação do PSO, primeiramente é necessário escolher uma forma de representação para as partículas. Isso deve ser realizado levando em conta as características do problema em questão. No caso, é necessário representar o conjunto dos parâmetros da LT os quais se deseja estimar. A partícula, portanto, é modelada conforme a Figura 20.

Corrente eficaz (A)	Tensão eficaz (V)	Altura cabo-solo (m)	Distância entre condutores fase (m)	Diâmetro equivalente (m)
---------------------	-------------------	----------------------	-------------------------------------	--------------------------

Figura 20 – Representação de uma partícula

Todas as variáveis que compõem a partícula são do tipo real. Cabe observar que a partir da expressão (2.5) é possível, por meio de um procedimento de otimização, obter o número de subcondutores, os seus diâmetros e o espaçamento entre eles em um *bundle*, conhecendo-se o

diâmetro equivalente. No entanto, esses parâmetros não serão calculados neste trabalho, pois não serão relevantes para o desenvolvimento do método apresentado.

4.4.1 Inicialização e estabelecimento de restrições

Com o propósito de direcionar as partículas a regiões mais promissoras do espaço de busca, evitando que se dirijam a regiões ineficazes, foram utilizados limites de variação para os parâmetros da LT durante a otimização, bem como para criação do enxame inicial.

As partículas são inicializadas aleatoriamente com uma distribuição uniforme, dentro dos limites estabelecidos na Tabela 1. A eficiência do PSO é influenciada pela diversidade inicial do enxame, ou seja, quanto o espaço de busca é coberto e quão bem distribuídas estão as partículas neste (ENGELBRECHT, 2007).

A utilização de limites permite que apenas a porção importante do espaço de busca seja pesquisada (espaço viável), afastando o algoritmo de áreas onde a solução desejada possivelmente não seria encontrada. No caso da inicialização, um exemplo seria a geração de uma partícula com diâmetro equivalente negativo, tal qual $-0,5$ m. Nesse caso, a partícula estaria posicionada numa área sabidamente inviável, já que do ponto de vista físico não há condutor com dimensões negativas.

A Figura 21 ilustra o espaço de busca e a distribuição inicial das partículas uniformemente distribuídas neste.

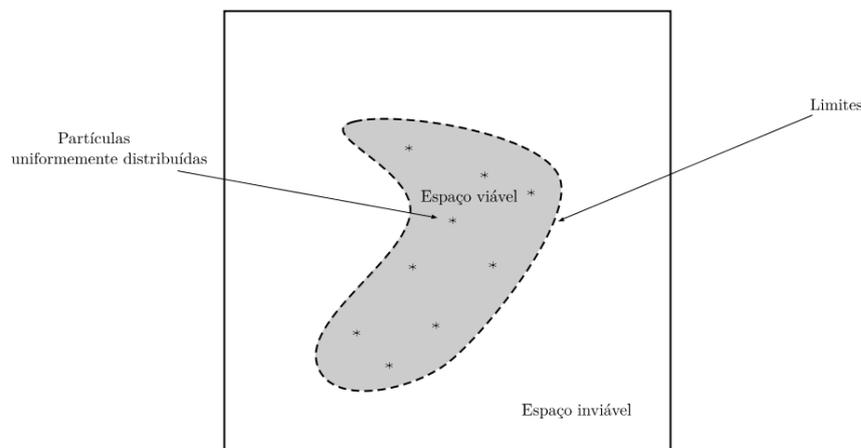


Figura 21 – Representação do espaço de busca.

O algoritmo PSO não prevê o tratamento de restrições, no entanto algumas opções podem ser adotadas.

Uma técnica bastante utilizada é penalização da aptidão da partícula considerada ineficaz. Consiste em alterar a função objetivo, substituindo-a por uma função objetivo penalizada, caso viole alguma restrição ou limite imposto. Para um problema de maximização, resulta em subtrair da função objetivo um valor proporcional à violação ocorrida, reduzindo o seu valor e,

por consequência, a aptidão da partícula, sem contudo eliminá-la ou alterá-la. Caso o problema seja de minimização, realiza-se o inverso, ou seja, aumenta-se o valor da função objetivo, tornando a partícula menos interessante. A penalização proporciona boa exploração do espaço de busca, mantendo a diversidade do enxame (PARSOPOULOS; VRAHATIS, 2010).

Tabela 1 – Limites estabelecidos para variação dos parâmetros durante o procedimento de otimização.

Parâmetro	Restrição
Corrente (A)	de 0 a Valor Limite (+)
Tensão (V)	de 0 a Valor Limite (+)
Altura cabo-solo (m)	de 0 a Valor Limite (+)
Distância horizontal entre fases (m)	de 0 a Valor Limite (+)
Diâmetro Equivalente (cm)	de 0,01 a Valor Limite (+)

O Valor Limite (+) pode ser estabelecido por observação, no caso da altura cabo-solo e da distância horizontal entre fases. Por exemplo, o valor limite (+) de 30 m para ambas seria possivelmente adequado para boa parte das LTs. Para o caso da corrente, estipulamos um valor alto positivo, pressupondo o completo desconhecimento de seus valores. Um valor testado foi 1000 (A), o que garante um limite apropriado para boa parte das LTs. Para a tensão, é possível que se saiba previamente qual é a classe da LT. Nesse caso, sugere-se que o Valor Limite (+) seja o valor da classe conhecida da LT acrescido de 50%. Caso não se saiba previamente a classe de tensão, pode-se arbitrar um valor superior ao da maior classe de tensão de LT no Brasil, por exemplo, 800 kV. Para o diâmetro equivalente estipulou-se 1 m, hipoteticamente, pois certamente seu valor será inferior a este limite, dadas as características técnicas dos cabos disponíveis comercialmente.

Outros limites, contudo, podem ser testados, e sua função é limitar a busca, sem ser muito restritivo, no entanto.

Por exemplo, o conhecimento prévio aproximado da faixa de variação do diâmetro equivalente, obtido por inspeção visual da LT ou pelo conhecimento de valores comerciais disponíveis para os condutores, pode auxiliar fixando um limite ainda mais restritivo para este parâmetro, o que poderá colaborar na obtenção de LTs simuladas mais próximas da real. Contudo, como no caso desta dissertação foi possível o conhecimento prévio de parâmetros de carregamento obtidos junto à concessionária, a faixa de variação do diâmetro equivalente foi deixada ampla, de acordo com a Tabela 1, e os dados de carregamento foram usados como auxiliares na escolha da LT simulada mais apropriada, como será apresentado no Capítulo 5.

4.4.2 Erro e função de avaliação

A avaliação de uma partícula é obtida pelo seu erro médio percentual absoluto total $Z(X)$, e este é calculado por (4.3).

$$Z(X) = e(X) + b(X) \quad (4.3)$$

com,

$$e(X) = \frac{\sum_{i=1}^{nptos} \left| \frac{(E_{s_i} - E_{m_i})}{E_{m_i}} \cdot 100 \right|}{nptos} \quad (4.4)$$

e,

$$b(X) = \frac{\sum_{i=1}^{nptos} \left| \frac{(B_{s_i} - B_{m_i})}{B_{m_i}} \cdot 100 \right|}{nptos} \quad (4.5)$$

onde, $e(X)$ é o erro médio percentual absoluto do campo elétrico simulado da partícula X em relação ao campo elétrico medido; $b(X)$ é o erro médio percentual absoluto da densidade de fluxo magnético simulada para a partícula X em relação à densidade de fluxo magnético medida; $nptos$ é o número total de pontos de medição; E_{s_i} é o valor do campo elétrico simulado para a partícula em questão no ponto i ; E_{m_i} é o valor do campo elétrico medido no ponto i ; B_{s_i} é a densidade de fluxo magnético simulada para a partícula em questão no ponto i ; e B_{m_i} é o valor da densidade de fluxo magnético medida no ponto i .

Os valores da intensidade de campo elétrico e da densidade de fluxo magnético em LTs possuem tipicamente magnitudes bem distintas. Nessa situação, é importante que os valores sejam normalizados, com o fim de evitar distorções na função de avaliação que prejudiquem a convergência do algoritmo. Por esse motivo, a aplicação do erro médio percentual absoluto foi adotada como solução para normalização dos valores dos campos.

Os campos elétrico e magnético simulados são obtidos pela aplicação das equações de Potencial de Maxwell, (2.2) a (2.11), e pela Lei de Bio-Savart, (2.12) a (2.17), aos parâmetros simulados.

4.4.3 Penalização de uma partícula

Durante o processo de otimização, cada parâmetro i da partícula X deverá respeitar o limite estabelecido para sua variação, e caso o viole, sofre a penalização P_{X_i} correspondente, de acordo com a expressão (4.6).

$$P_{X_i} = \begin{cases} 0, & \text{se } lf_i \leq X_i \leq ls_i \\ \frac{|X_i - l_v|}{(ls_i - lf_i)}, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.6)$$

em que, X_i é o valor simulado para o parâmetro i da partícula X , l_v é o valor do limite violado; ls_i e lf_i são os limites superior e inferior do parâmetro, respectivamente, estabelecidos de acordo com a Tabela 1.

A penalização total de uma partícula X é dada por

$$P_{X_{total}} = \sum_{i=1}^{npar} P_{X_i} \quad (4.7)$$

em que i é o parâmetro em questão e $npar$ é o número total de parâmetros.

O erro penalizado da partícula X é expresso por:

$$Z_{penalizada}(X) = Z(X) + (Z(X) \cdot (P_{X_{total}})) \quad (4.8)$$

A aptidão da partícula é inversamente proporcional ao seu erro penalizado, e, portanto, calculada por

$$A(X) = \frac{1}{Z_{penalizada}(X)} \quad (4.9)$$

4.4.4 Algoritmo PSO Multi-Ring aplicado à estimação de parâmetros de LTs

O algoritmo PSO Multi-Ring aplicado à estimação de parâmetros de LTs é apresentado a seguir. Este algoritmo é codificado com Matlab em programa desenvolvido pelo autor.

Algoritmo 4 Algoritmo PSO Multi-Ring aplicado à estimação de parâmetros de LTs

-
- 1: Gerais: Inicialize o número de anéis, o número de partículas por anel, o melhor melhor *fitness* da vizinhança, a melhor posição da vizinhança, o *ringbest* de cada anel, o best *ringbest*, t_r , e defina os parâmetros gerais do PSO.
 - 2: Entre com os valores das medições dos campos elétrico e magnético da LT, com o número de pontos de medição e suas coordenadas
 - 3: Defina os limites de variação dos parâmetros durante a simulação, conforme a Tabela 1
 - 4: **enquanto** Erro estipulado ou número máximo de iterações não for atingido **faça**
 - 5: **para** $i \leftarrow 1$ **até** *num_de_aneis* **faça**
 - 6: rotacione o anel
 - 7: **para** $j \leftarrow 1$ **até** *num_particulas_anel* **faça**
 - 8: Atualize velocidade da partícula
 - 9: Atualize posição da partícula
 - 10: Calcule \vec{E} da partícula usando equações (2.2) a (2.11) nos pontos definidos
 - 11: Calcule \vec{B} da partícula usando equações (2.12) a (2.17) nos pontos definidos
 - 12: Calcule erro da partícula usando equação (4.3)
 - 13: Aplique a equação (4.8) para penalização se partícula violar limites e calcule a aptidão após a penalização com a equação (4.9)
 - 14: **se** aptidão < pbest **então** ▷ Atualiza o pbest
 - 15: pbest \leftarrow aptidão
 - 16: **fim se**
 - 17: **se** aptidão < melhor_aptidão_da_vizinhança **então**
 - 18: melhor_aptidão_da_vizinhança \leftarrow aptidão
 - 19: melhor_posicao_da_vizinhança \leftarrow posição_da_partícula
 - 20: **fim se**
 - 21: **fim para**
 - 22: Defina o ringbest ▷ Determina a melhor partícula do ring
 - 23: **fim para**
 - 24: Defina o best_ringbest ▷ Determina o melhor ringbest
 - 25: **fim enquanto**
- devolve** $Z = \text{best_ringbest}$
-

5 Resultados

O método proposto baseia-se na medição dos campos elétricos e magnéticos de uma LT. Por esse motivo, iniciamos este capítulo pela medição da intensidade dos campos elétricos e magnéticos em seções horizontais de duas LTs trifásicas de circuito simples e fases horizontais, operando em corrente alternada e em regime permanente, pertencentes a interligações distintas e localizadas à distância de vários quilômetros uma da outra, na região metropolitana de Goiânia/GO. Ambas são de classe de tensão 230 kV.

Essas LTs serão denominadas LT 01 e LT 02 no decorrer deste capítulo. Para as medições, foi utilizado o medidor de campos elétricos e magnéticos modelo EFA 200/300 como descrito no Apêndice B.

5.1 LT 01

O vão escolhido para a medição da LT 01 localiza-se em ambiente urbano, em área descampada, com vegetação rasteira, sem a presença de grandes obstáculos e com esparsa vegetação de maior porte próxima, em terreno razoavelmente plano. A figura 22 apresenta o panorama do local e o eixo adotado para a medição. Foram medidos 41 pontos, sendo 20 de cada lado, mais um ponto sob a fase central, espaçados em 1 m uns dos outros e à altura de 1,5 m, totalizando 40 m de servidão da linha, seguindo o esquema de medição descrito no Apêndice A.

As curvas dos campos elétrico e magnético medidos na LT 01 são apresentadas na Figura 23.

As medições foram realizadas em uma sexta-feira, no período de 17:19 às 17:42, e os dados reais de carregamento da linha, obtidos na subestação, são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 2 – Dados de carregamento da LT 01

Corrente média (A)	326,50
Tensão (kV)	235
Potência ativa (MW)	129,06
Potência Reativa (MVar)	36,12

Os limites de variação dos parâmetros simulados, fixados antes da execução do método, são apresentados na tabela a seguir.



Figura 22 – LT 01 - Local da medição (Goiânia)

Tabela 3 – Limites de variação dos parâmetros simulados durante a execução do método

	Tensão (kV)	Corrente (A)	Altura cabo-solo de cada fase (m)	Distância entre as fases (m)	Diâmetro equivalente (cm)
Limite Superior	300	2.000	50	50	100
Limite Inferior	0	0	1	1	1

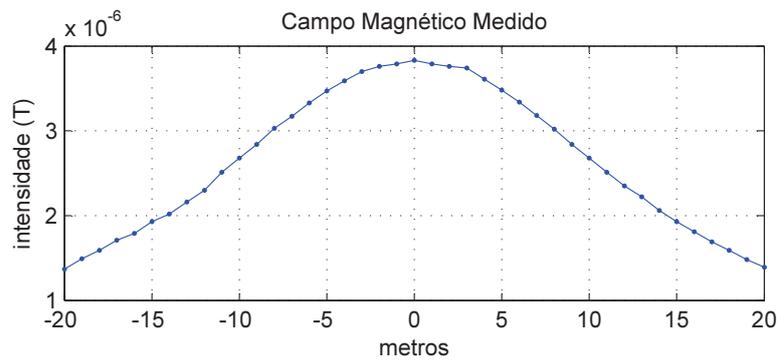
As simulações realizadas utilizaram as configurações gerais do PSO Multi-Ring dispostas na Tabela 4, testando-se anéis com 3 e com 6 partículas, para fins de comparação.

Tabela 4 – Configuração dos parâmetros gerais do PSO Multi-Ring para a LT 01

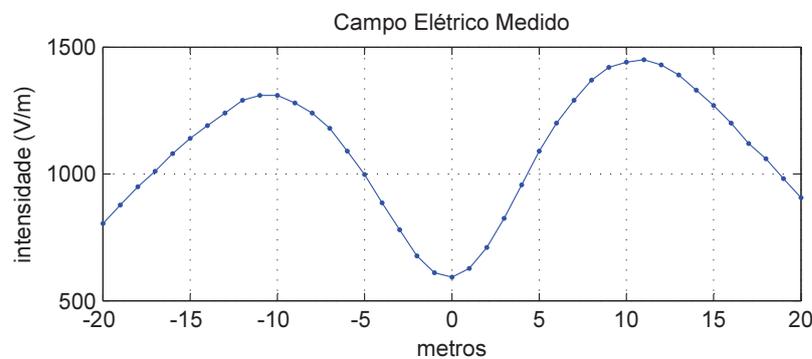
Nº de partículas	30
Gatilho de disparo da rotação	20
Condição de parada	Varição de best_ringbest $\leq 10^{-6}$ durante 20 iterações

5.1.1 LT 01 com PSO Multi-Ring com tamanho de anel = 3

Foram realizadas 10 simulações com esta configuração, que implica em 10 anéis contendo 3 partículas cada, e os resultados encontrados são apresentados nas Tabelas 5 e 6.



(a) Campo magnético - LT 01



(b) Campo elétrico - LT 01

Figura 23 – Campos medidos na LT 01

A tabela 5 apresenta os resultados das simulações com ênfase no erro dos campos simulados em relação aos medidos. Nesta, a coluna “H” é a altura cabo-solo, “S” é o espaçamento entre fases, “D” é o diâmetro equivalente dos condutores e “Erro dos campos” é o erro entre os campos simulados e os medidos.

A Tabela 6, por sua vez, apresenta o erro da corrente e tensão simuladas em relação aos dados de carregamento.

Para efeito de análise, considerou-se as duas melhores simulações dentre as dez executadas, entendidas como tal aquelas que apresentassem a menor soma dos erros de corrente e de tensão. Nessa situação, as simulações 2 e 10 cumprem esse requisito e são apresentadas em destaque nas duas tabelas. Observa-se na Simulação 2 que o erro de tensão é zero.

Pode-se notar que os valores de “H” e de “S” variam entre 14,00 e 14,15 m, e entre 6,52 e 6,58 m, respectivamente. Isto indica uma boa precisão do processo de otimização, ou seja, os valores encontrados estão bem próximos da solução do problema.

Com o intuito de mostrar melhor como as soluções encontradas se aproximam da solução ótima, a Tabela 6 mostra o erro percentual de cada simulação em relação à tensão e à

Tabela 5 – Resultado de 10 simulações com tamanho de anel = 3

	Corrente (A)	Tensão (kV)	H (m)	S (m)	D (cm)	Erro campo (%)	Iterações	Tempo (s)
Simulação 1	317,4	256,7	14,07	6,55	2,02	6,243	311	69,09
Simulação 2	314,7	235,0	14,02	6,57	3,48	6,258	1015	222,12
Simulação 3	321,7	300,0	14,15	6,52	0,68	6,216	1154	250,74
Simulação 4	321,7	300,0	14,15	6,52	0,68	6,216	1640	359,72
Simulação 5	321,7	300,0	14,15	6,52	0,68	6,216	1023	223,60
Simulação 6	313,4	221,5	14,00	6,58	4,98	6,265	1060	229,75
Simulação 7	321,7	299,9	14,15	6,52	0,68	6,216	1168	251,34
Simulação 8	321,0	290,1	14,14	6,52	0,87	6,223	712	154,96
Simulação 9	321,7	299,9	14,14	6,52	0,67	6,216	841	183,10
Simulação 10	314,1	227,4	14,01	6,58	4,27	6,262	248	53,36

Tabela 6 – Erro percentual entre a corrente e a tensão encontradas nas 10 simulações com tamanho de anel = 3 e os dados reais de carregamento da LT 01

	Corrente	Tensão
Simulação 1	2,787	9,234
Simulação 2	3,614	0,000
Simulação 3	1,470	27,660
Simulação 4	1,470	27,660
Simulação 5	1,470	27,660
Simulação 6	4,012	5,745
Simulação 7	1,470	27,617
Simulação 8	1,685	23,447
Simulação 9	1,470	27,617
Simulação 10	3,798	3,234

corrente da linha, dadas pela Tabela 2.

Pelos resultados da Tabela 6, pode ser utilizada a simulação 2 como resposta ao problema, ou seja, determinar os parâmetros da LT 01 (solução) na Tabela 7.

Tabela 7 – Solução para a LT 01 com tamanho de anel = 3

Altura cabo-solo (m)	14,02
Distância entre fases (m)	6,57
Diâmetro equivalente dos condutores (cm)	3,48

Da análise dos resultados dispostos na Tabela 5, há uma característica peculiar a ser observada. As simulações que produziram os menores erros em relação à corrente e tensão encontradas não necessariamente foram as que produziram os menores erros em relação aos

campos elétricos e elétricos.

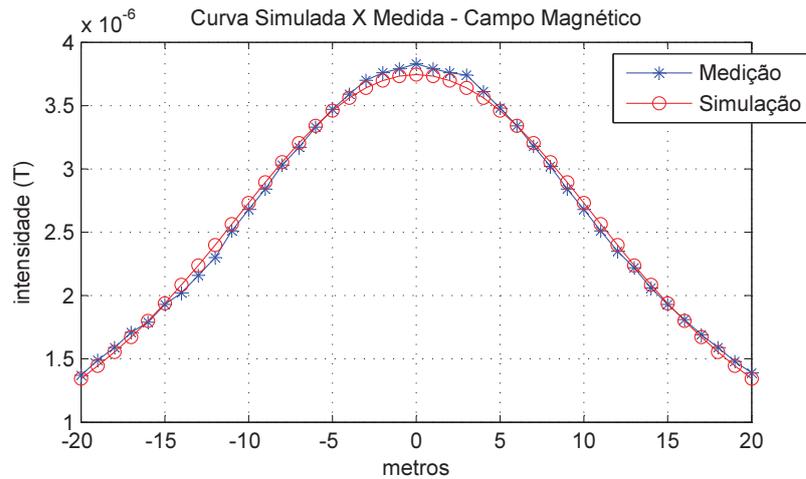
Do ponto de vista do comportamento dos resultados de simulação existe, aparentemente, uma menor sensibilidade do método em relação ao diâmetro equivalente. No caso de não haver informação em relação ao carregamento da LT, é necessário que outras informações auxiliem na escolha do resultado de simulação.

Assim, uma simples inspeção visual pode indicar, por exemplo, que uma das simulações não corresponde à realidade.

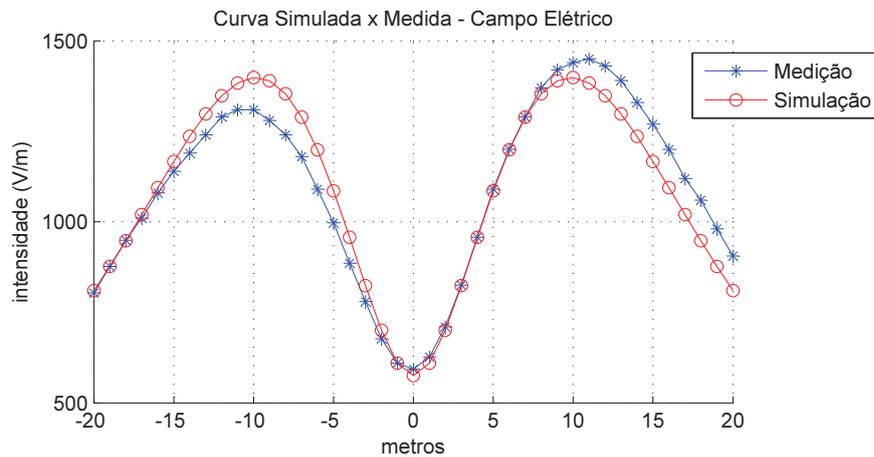
Por exemplo, na simulação 3, um diâmetro equivalente muito pequeno, 6,8 mm, com uma corrente de 321 A é fisicamente inviável.

Com relação ao tempo de execução, verifica-se que foi de 222,12 segundos para a simulação 2 e de apenas 53,36 segundos para a simulação 10. Ambos os tempos podem ser considerados viáveis, principalmente tendo em vista que outros procedimentos usuais hoje utilizados para obtenção desses parâmetros poderiam ser mais custosos ou onerosos. Deste modo, outra condição que pode ser levada em conta no método é o seu baixo tempo de execução. O tempo médio de execução, calculado considerando-se todas as 10 simulações da Tabela 5, é de 119,78 segundos, o qual também é bastante razoável.

A Figura 24 ilustra as curvas medidas e as simuladas para a LT 01, comparativamente, para a simulação 2, com o tamanho de anel = 3.



(a) Resultado para o campo magnético - LT 01



(b) Resultado para o campo elétrico - LT 01

Figura 24 – Resultado da simulação 02 para a LT 01 usando PSO Multi-Ring de tamanho de anel = 3

5.1.2 LT 01 com PSO Multi-Ring com tamanho de anel = 6

Para se observar os efeitos da variação no tamanho do anel sobre os resultados encontrados nas simulações para a LT 01, o tamanho do anel foi alterado de 3 para 6, resultando, nesta nova configuração, em 5 anéis de 6 partículas cada, mantida a mesma população de 30 partículas.

Do mesmo modo que na seção anterior, foram realizadas 10 simulações, mantidas todas as demais configurações.

Os resultados são apresentados nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 – Resultado de 10 simulações com tamanho de anel = 6

	Corrente (A)	Tensão (kV)	H (m)	S (m)	D (cm)	Erro campo (%)	Iterações	Tempo (s)
Simulação 1	307,5	177,0	13,89	6,63	15,53	6,305	436	96,64
Simulação 2	315,4	238,2	14,04	6,57	3,23	6,255	841	189,67
Simulação 3	316,5	259,7	14,06	6,55	1,84	6,244	993	221,55
Simulação 4	321,7	300,0	14,15	6,52	0,68	6,216	872	193,12
Simulação 5	315,6	244,1	14,03	6,56	2,75	6,252	1280	288,85
Simulação 6	305,7	163,4	13,86	6,65	22,27	6,314	1264	279,28
Simulação 7	300,1	119,7	13,74	6,71	71,49	6,355	85	19,77
Simulação 8	301,4	153,3	13,80	6,71	28,18	6,326	457	102,77
Simulação 9	319,2	277,0	14,10	6,53	1,19	6,231	846	190,04
Simulação 10	316,9	253,4	14,07	6,56	2,18	6,247	463	109,86

Tabela 9 – Erro percentual entre a corrente e a tensão encontradas nas 10 simulações com tamanho de anel = 6 e os dados reais de carregamento da LT 01

	Corrente	Tensão
Simulação 1	5,819	24,681
Simulação 2	3,400	1,362
Simulação 3	3,063	10,511
Simulação 4	1,470	27,660
Simulação 5	3,338	3,872
Simulação 6	6,371	30,468
Simulação 7	8,086	49,064
Simulação 8	7,688	34,766
Simulação 9	2,236	17,872
Simulação 10	2,940	7,830

Embora as referências indiquem que o aumento do tamanho do anel melhora o desempenho das simulações, a princípio, os resultados das 10 simulações com tamanho de anel = 6 se mostraram ligeiramente piores que as com tamanho de anel = 3, quando se compara as Tabelas 5 e 8.

Isto é evidente, dado que se dispõe das informações de carregamento da LT.

Em relação aos resultados encontrados nas 10 simulações com esta configuração, verifica-se que os menores erros referentes a corrente e tensão foram obtidos na simulação 2, como pode ser visto na Tabela 9. Nesse caso, os valores dos respectivos parâmetros obtidos pela simulação são os apresentados na linha 2 da Tabela 8.

Vale aqui a mesma observação feita para a simulação anterior. Caso não se tenha informação a respeito do carregamento da LT, é possível aplicar o bom senso e escolher uma das

soluções obtidas na Tabela 8.

O tempo de execução também aumentou no caso das duas melhores simulações, em relação às duas melhores da configuração com tamanho de anel = 3, ao se comparar as Tabelas 8 e 5. A explicação para isso é que ao se aumentar o número de partículas por anel, aumenta-se a exploração local e diminui-se a global, o que desacelera a convergência, já que a troca de informações entre as partículas se torna mais lenta, visto que a pesquisa no espaço de busca será mais aprofundada em cada localização.

5.2 LT 02

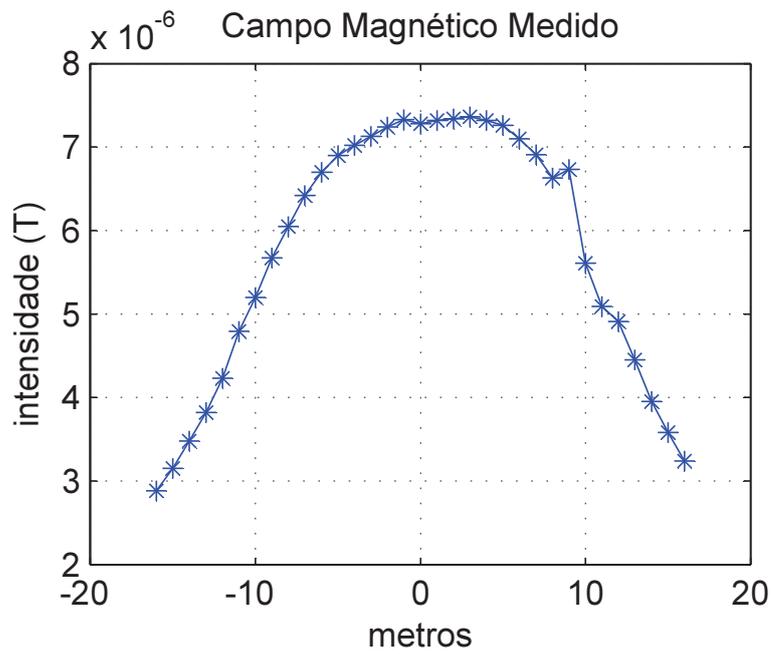
O vão escolhido para a LT 02 também encontra-se em ambiente urbano. A seção medida localiza-se sobre um canteiro central de largura aproximada de 34 m, de uma movimentada avenida de um bairro da região metropolitana de Goiânia. A fase central, coincidentemente, dispõe-se longitudinalmente ao centro do canteiro. O piso do local é formado por vegetação gramínea, sem calçamento por cimento ou concreto, apesar da proximidade do piso asfaltado. A Figura 25 mostra o local da medição. Foram definidos 33 pontos, sendo 16 de cada lado, mais o ponto sob a fase central, deixando-se 1 m de cada lado sem utilização para a medição, por questões de segurança tendo em vista a proximidade das pistas da avenida. Por este motivo, não foram adotados os mesmos 20 m de cada lado da linha como fora realizado na LT 01.



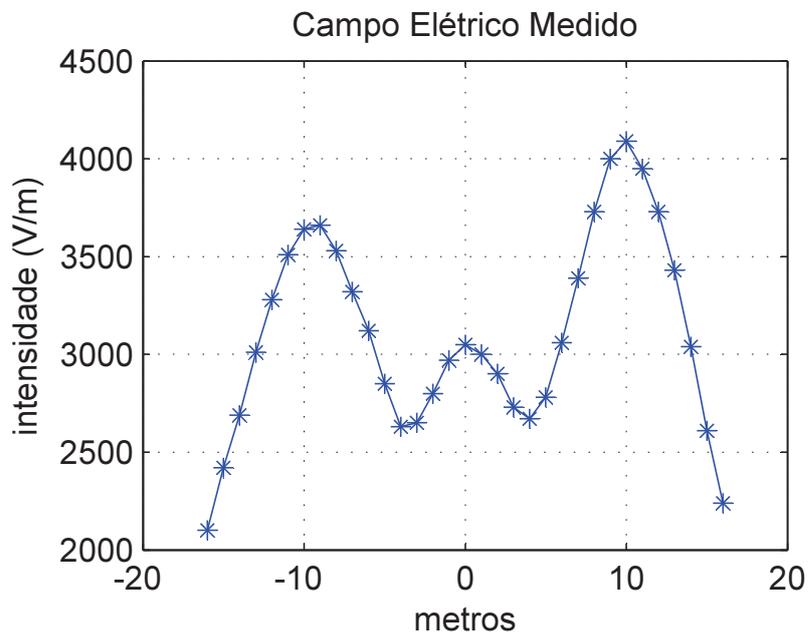
Figura 25 – LT 02 - Local da medição (região metropolitana de Goiânia)

A medição foi realizada em uma sexta-feira, de 16:12 às 16:35, do mês de agosto.

As curvas dos campos elétricos e magnéticos medidos na LT 02 são apresentadas na Figura 26.



(a) Campo magnético - LT 02



(b) Campo elétrico - LT 02

Figura 26 – Campos medidos na LT 02

Os dados de carregamento obtidos na subestação são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 10 – Dados de carregamento LT 02

Corrente média (A)	243,67
Tensão (kV)	230
Potência Ativa (MW)	100,32
Potência Reativa (MVar)	18,12

Considerando que a LT 02 possui a mesma classe de tensão e disposição horizontal dos condutores da LT 01, foram usados os mesmos limites de variação dos parâmetros simulados apresentados na Tabela 3.

As simulações realizadas utilizaram as configurações gerais do PSO Multi-Ring dispostas na Tabela 11. Por conta dos resultados encontrados na LT 01, serão apresentados para a LT 02 os resultados de simulação apenas com o PSO Multi-Ring com tamanho de anel = 3.

Tabela 11 – Configuração dos parâmetros gerais do PSO Multi-Ring para a LT 02

Nº de partículas	30
Gatilho de disparo da rotação	20

5.2.1 LT 02 com PSO Multi-Ring com tamanho de anel = 3

Foram realizadas 10 simulações para a LT 02 com tamanho de anel = 3, mantendo-se os demais parâmetros gerais do PSO Multi-Ring conforme apresentado na Tabela 11.

Como tamanho do enxame definido é de 30 partículas, têm-se 10 anéis de 3 partículas cada.

Os resultados são apresentados nas Tabelas 12 e 13. Estão em destaque nestas tabelas os resultados que correspondem ao menor erro em relação ao carregamento conhecido.

Tabela 12 – LT 02 - Resultado de 10 simulações com tamanho de anel = 3

	Corrente (A)	Tensão (kV)	H (m)	S (m)	D (cm)	Erro campo (%)	Iterações	Tempo (s)
Simulação 1	240,1	113,1	8,36	8,59	96,83	7,190	306	74,80
Simulação 2	240,6	112,1	8,37	8,58	100,00	7,189	580	143,93
Simulação 3	234,3	176,3	8,23	8,69	15,75	7,339	332	82,11
Simulação 4	240,4	112,1	8,37	8,58	100,00	7,187	764	185,44
Simulação 5	240,4	112,1	8,37	8,58	100,00	7,187	403	97,04
Simulação 6	232,6	191,2	8,18	8,69	9,96	7,371	699	178,60
Simulação 7	232,1	200,6	8,19	8,72	7,70	7,390	471	120,13
Simulação 8	240,422	112,1	8,37	8,58	100,00	7,187	766	245,73
Simulação 9	230,0	230,3	8,16	8,75	3,21	7,434	271	84,08
Simulação 10	240,4	112,1	8,37	8,58	100,00	7,187	948	297,94

Tabela 13 – Erro percentual entre a corrente e a tensão encontradas nas 10 simulações com tamanho de anel = 3 e os dados de carregamento da LT 02

	Corrente	Tensão
Simulação 1	1,465	50,826
Simulação 2	1,260	51,261
Simulação 3	3,845	23,348
Simulação 4	1,342	51,261
Simulação 5	1,342	51,261
Simulação 6	4,543	16,870
Simulação 7	4,748	12,783
Simulação 8	1,342	51,261
Simulação 9	5,610	0,130
Simulação 10	1,342	51,261

Aqui valem as observações realizadas em relação ao conhecimento prévio de parâmetros geométricos e de carregamento. É possível utilizar o bom senso e escolher soluções para o problema a partir dos resultados da Tabela 12.

O conhecimento prévio de algum dos parâmetros, portanto, é salutar como ferramenta auxiliar para influenciar e direcionar o método à solução desejada, considerando a existência de múltiplas soluções que atenderiam à minimização do erro entre as curvas medida e simulada, como também ficou demonstrado na análise realizada na seção anterior, relativa à LT 01.

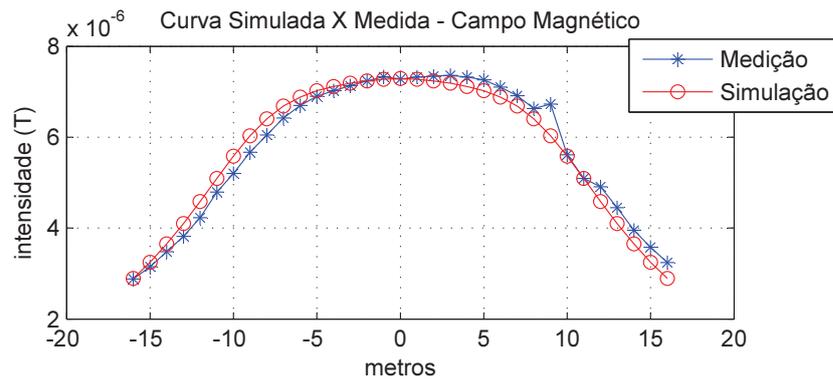
Como já analisado anteriormente, sugere-se a adoção do diâmetro equivalente como parâmetro auxiliar no direcionamento da busca da LT desejada que melhor corresponda à realidade.

Dos resultados expostos nas Tabelas 12 e 13, pode ser utilizada a simulação 9 como solução do problema de estimação dos parâmetros da LT, os quais são apresentados na Tabela 14

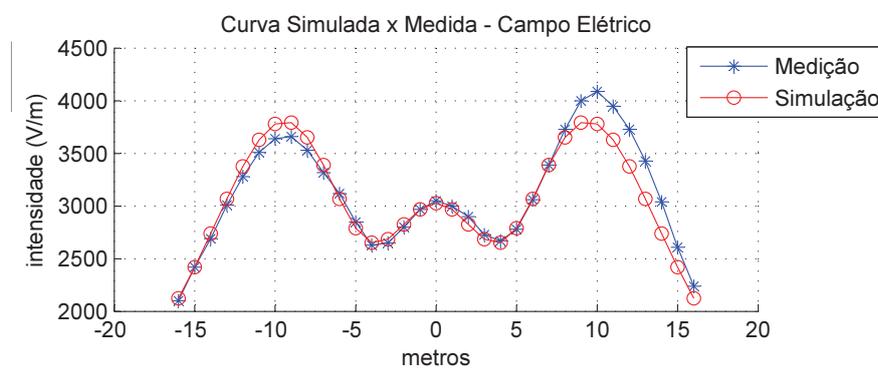
Altura cabo-solo (m)	8,16
Distância entre fases (m)	8,75
Diâmetro equivalente dos condutores (cm)	3,21

Tabela 14 – Solução para a LT 02 com tamanho de anel = 3

A Figura 27 ilustra os gráficos comparativos para a LT 02.



(a) Resultado para o campo magnético - LT 02



(b) Resultado para o campo elétrico - LT 02

Figura 27 – Resultado da simulação 9 para a LT 02 usando PSO Multi-Ring de tamanho de anel = 3

Com relação ao tempo de execução, que pode ser avaliado pela Tabela 12, o mais alto foi de 297,94 segundos na simulação 10 e o menor de 74,80 segundos. Os tempos encontrados nas simulações 7 e 9, que apresentaram os menores erros de corrente e tensão, respectivamente, foram de 120,13 segundos e de 84,08 segundos, o que implica em tempos bastante aceitáveis para o problema. O tempo médio das 10 simulações foi de 151 segundos, o que pode se considerar um tempo de execução baixo, e portanto, muito adequado. Com relação aos bons tempos de execução encontrados, é importante ressaltar que derivam da característica de rápida convergência do PSO. A convergência precoce, por sua vez, é evitada pelo uso do PSO Multi-Ring.

5.3 Considerações gerais sobre os resultados das simulações

As simulações realizadas tanto para a LT 01 quanto para a LT 02 demonstraram a eficácia e eficiência do método na estimação dos parâmetros da LT, sob certas condições.

A principal condição é que se conheça previamente um dos parâmetros da LT, o qual poderá auxiliar no processo de decisão da LT correta.

Para esse intento sugere-se a adoção do diâmetro equivalente calculado a partir do co-

nhecimento dos dados de projeto relativos aos condutores da LT. O tipo dos condutores usualmente não muda durante todo o percurso da LT, o que qualifica o diâmetro equivalente como bom parâmetro para referência do método, já que em qualquer seção em que o método seja aplicado, suas dimensões serão as mesmas. Isso pode não acontecer com os demais parâmetros (corrente, tensão, altura cabo-solo e distância entre fases).

Além disso, apesar do método encontrá-lo como resultado secundário, não há interesse expresso em obtê-lo, pois este não sofre alterações relevantes em relação aos dados de projeto, bem como não é um dado relevante para monitoramento da LT.

Outra importante característica notada nas simulações foi o tempo de execução baixo, uma condição importante e desejada em qualquer solução utilizando otimização como princípio, sobretudo quando se emprega um método estatístico, como foi o caso.

Em relação às medições, estas estão suscetíveis a fatores que podem interferir nos resultados do método, por alterar, de alguma forma, o perfil típico de campo elétrico e magnético esperados na medição. Algumas dessas condições estão listadas a seguir.

- Desequilíbrio nas tensões de fase;
- Desequilíbrio nas correntes de linha;
- Perturbações (imperfeições) do terreno;
- Assimetria resultante nas curvas de campos elétrico e magnético;
- Inclinação dos cabos;

Não foi foco do trabalho, contudo, apresentar meios de contornar essas condições, dado que algumas delas não podem ser eliminadas ou solucionadas por completo. De todo modo, os resultados demonstraram bom desempenho do método, mesmo em circunstâncias em que as curvas medidas apresentaram algum tipo de variação em relação ao perfil teórico.

Pelos bons resultados encontrados pelas simulações apresentadas neste capítulo, pode-se concluir que o método é promissor para monitoramento de LTs, dada sua robustez e simplicidade de implementação, bem como pela possibilidade de melhoramentos que o tornem ainda mais confiável.

6 Conclusão

Avaliar as condições de operação de LTs é algo desejável e necessário a todos as empresas e órgãos governamentais envolvidos na operação e controle do sistema elétrico de qualquer país. A operação em condições de segurança não só pode garantir uma alta disponibilidade do sistema, como, também, ajudar a promover sua melhor utilização.

As LTs, no contexto de um sistema elétrico intensamente interligado, como o do Brasil, assumem importância basilar no transporte e intercâmbio de energia.

Neste trabalho, apresentou-se um método de estimação de parâmetros de LTs baseado na metaheurística PSO.

A metodologia utilizada baseou-se na utilização dos campos elétricos e magnéticos medidos sob uma LT de condutores horizontais, trifásica, de corrente alternada, para estimar a corrente, tensão, altura cabo-solo e distância entre fases, por meio de um procedimento de otimização utilizando o PSO Multi-Ring e na aplicação de métodos de cálculo desses campos dispostos no Capítulo 2, .

As medições foram realizadas em LTs na região metropolitana de Goiânia, em áreas urbanas.

Os resultados foram apresentados no Capítulo 5 e demonstraram que o método é bastante promissor, suprimindo uma possível lacuna acadêmica sobre o tema de estimação de parâmetros de LTs.

Ainda com relação aos resultados, pode-se destacar que o método é eficaz na descoberta dos parâmetros, pois é capaz de obter configurações com erro significativamente baixo, e opera com eficiência, pois faz isso em tempo de execução admissível e com número de iterações controlado.

O erro entre a simulação e os dados de carregamento pôde ser avaliado em relação à corrente e à tensão, pois a concessionária de energia proprietária das LTs disponibilizou os dados de carregamento, mas não pôde ser realizada avaliação quanto à altura cabo-solo e à distância entre fases na seção medida. Para esse fim, seria necessário utilizar equipamentos apropriados, dos quais não se dispunha para esta dissertação, como medidores ultrassônicos ou a laser, e então comparar estes resultados de medição direta com os simulados. Sugere-se que, em trabalhos futuros, seja realizada a comparação da simulação com as medições obtidas por estes equipamentos para os parâmetros em questão. Apresentou-se no Capítulo 5, contudo, motivos que permitem inferir que os resultados simulados obtidos para a altura cabo-solo e distância entre fases estão corretos e próximos das medições reais destes parâmetros.

Certas limitações, que tem como origem a utilização dos campos elétricos e magnéticos

como base do método puderam também ser percebidas. Alterações nos campos devidos a motivos diversos (como presença de obstáculos próximo, por exemplo) ou erros de medição ou pelo próprio comportamento multimodal do problema, em que múltiplas LTs distintas podem apresentar campos semelhantes, podem dificultar a escolha dos resultados do método, ensejando o uso de um parâmetro pré conhecido para auxiliar no processo de otimização.

Além disso, a configuração de parâmetros do PSO Multi-Ring, como o tamanho do anel, possui relevante impacto sobre a capacidade de exploração do método. Contudo, nos casos apresentados no Capítulo 5, a configuração com apenas 3 partículas por anel, ou seja, com menor capacidade de exploração produziu bons resultados, pois devido a erros introduzidos nos campos medidos, pelos motivos anteriormente apresentados, a LT desejada não foi exatamente a de menor erro entre os campos medido e simulado, mas se localizou a certo erro da LT de menor erro. Isso explica porque uma configuração aparentemente com menor capacidade de exploração obteve resultados melhores.

Outros parâmetros importantes do PSO são o tamanho da população e a condição de parada utilizada, e, especificamente em relação ao PSO Multi-Ring, o gatilho de disparo da rotação. Nesta dissertação, foram apresentadas as configurações desses parâmetros que produziram melhor resultado. Para cada problema, por vez, uma determinada configuração pode ser mais adequada e deverá ser analisada empiricamente.

De um modo geral, o método proposto apresenta a característica de não demandar altos investimentos, possuir implementação simples e resultados com bom nível de precisão, sugerindo que possa se apresentar como candidato à monitoração desses parâmetros em LTs.

Apesar de possíveis perturbações presentes nos campos medidos e do comportamento multimodal do problema, o método se mostrou robusto ao encontrar boas soluções apesar dessas condições, bastando que algum parâmetro da LT seja previamente conhecido para que seja possível determinar a LT desejada com facilidade. Como parâmetro candidato a essa referência de otimização sugere-se o diâmetro equivalente, conquanto mantém-se constante durante todo o trajeto da LT e considerando que os dados relativos aos condutores da LT geralmente estão disponíveis nos projetos das linhas.

Outra sugestão é que, sendo conhecido previamente o diâmetro equivalente, este seja usado como variável de entrada do método, juntamente com os campos medidos, expurgando, com isso, muitos resultados improdutivos obtidos nas simulações, os quais puderam ser eliminados, no caso desta dissertação, pelo conhecimento prévio dos dados de carregamento.

Outra vantagem do método é a capacidade de obtenção simultânea de corrente, tensão, altura cabo-solo e distância entre fases, sem necessidade de procedimentos separados para cada parâmetro, como usualmente é realizado em campo, bastando a disponibilidade de medidores de campo, dispensando a necessidade de equipamentos mais complexos, maiores e mais caros.

Ficou comprovada, também, a viabilidade do PSO MUlti-Ring para aplicação em pro-

blemas de estimação em sistemas elétricos, dados os bons tempos de execução obtidos e sua flexibilidade de modelagem aos problemas em sistemas elétricos, especialmente pela capacidade de escapar de mínimos locais durante sua execução.

Desse modo, pode-se concluir que a presente dissertação contribui para estudos de estimação de parâmetros de LT, sendo útil a pesquisadores e empresas da área de energia elétrica, especialmente no campo de monitoramento. Os estudos nesse campo têm aumentado em todo o mundo, frente à crescente demanda de energia e à necessidade de otimizar o uso dos ativos existentes, de modo a diminuir a necessidade de investimentos vultuosos e de manter alta disponibilidade dos sistemas.

Em relação ao uso do PSO como ferramenta de otimização para esse tipo de problema, pode-se dizer que há também contribuição significativa, pois ainda predomina, nesse campo, o uso da metaheurística algoritmos genéticos. O PSO mostra-se muito adequado ao uso em problemas de otimização contínua multimodal, característica presente em muitos problemas em sistemas de energia elétrica.

Por fim, como trabalhos futuros, sugere-se um estudo mais aprofundado das perturbações a que os campos estão sujeitos, de estratégias de mitigação destes efeitos sobre o método e da possibilidade de obtenção de outros parâmetros da LT além dos apresentados nesta dissertação, utilizando a mesma técnica.

Como consequência dos melhoramentos propostos, sugere-se também, como trabalho futuro, o desenvolvimento de um sistema piloto de monitoração completo de um vão da LT utilizando o método desenvolvido

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução Normativa Nº 398, de 23 de março de 2010*. 2010. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 36.
- AL-SALAMEH, M.; HASSOUNA, M. Arranging overhead power transmission line conductors using swarm intelligence technique to minimize electromagnetic fields. *Progress In Electromagnetics Research B*, v. 26, 2010. Citado na página 33.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA. 2015. Disponível em: <<http://www.abradee.org.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia>>. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 24.
- BASTOS-FILHO, C. et al. Multi-ring particle swarm optimization. *10th Brazilian Symposium on Neural Networks SBRN '08*, p. 111–116, 2008. Citado 6 vezes nas páginas 10, 56, 57, 58, 59 e 60.
- BECKER, W. D. *Estudo de técnicas para redução de campos magnéticos gerados por linhas de transmissão de potência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Agosto 2008. Citado 4 vezes nas páginas 20, 24, 33 e 34.
- BERGH, F. V. den; ENGELBRECHT, A. Effects of swarm size on cooperative particle swarm optimisers. *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, p. 892–899, 2001. Citado na página 46.
- BERGH, F. V. den; ENGELBRECHT, A. A new locally convergent particle swarm optimizer. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, IEEE Press, p. 96–101, 2002. Citado na página 54.
- BERGH, F. V. den; ENGELBRECHT, A. A cooperative approach to particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, p. 225–239, 2004. Citado na página 55.
- BRITS, R.; ENGELBRECHT, A.; BERGH, F. van den. A niching particle swarm optimizer. *Proceedings of the Fourth Asia-Pacific Conference on Simulated Evolution and Learning*, p. 692–696, 2002. Citado na página 56.
- CLERC, M. Think locally, act locally: The way of life of cheap-pso, an adaptive pso. *Technical report*, 2001. Disponível em: <<http://clerc.maurice.free.fr/pso/>>. Citado na página 48.
- CLERC, M.; KENNEDY, J. The particle swarm - explosion, stability and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, IEEE Press, p. 58–73, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 49, 50 e 53.
- CRUZ, C. B. C. W. *Estratégias de Mitigação do Campo Magnético Originado por Linhas Aéreas de Transmissão de Energia*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, Florianópolis, SC, Outubro 2009. Citado na página 33.

- DANKA JUNIOR, I. M. *Linhas de Transmissão Compactas Urbanas: A Adequação de Uma Evolução Tecnológica a Parâmetros de Licenciamento Ambiental Existentes*. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, PR, Dezembro 2009. Citado na página 34.
- ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. *Transmission Line Reference Book: 345 kV and Above*. 2. ed. [S.l.]: General Electric Company, 1982. Citado 10 vezes nas páginas 10, 19, 26, 28, 29, 32, 33, 34, 37 e 39.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Projeção da Demanda de Energia Elétrica para os Próximos 10 anos (2015-2024)*. Rio de Janeiro, Brasil, 2015. 78 p. Citado na página 17.
- ENGELBRECHT, A. P. *Fundamentals of Computational Swarm Optimization*. [S.l.]: John Wiley and Sons LTD., 2005. Citado 3 vezes nas páginas 42, 43 e 44.
- ENGELBRECHT, A. P. *Computational Intelligence: An Introduction*. 2. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons, 2007. Citado 12 vezes nas páginas 40, 42, 43, 44, 46, 47, 49, 50, 51, 52, 55 e 68.
- FILHO, E. B. da S. *Estudo de Campo Elétrico em Linha de Transmissão Utilizando o Método dos Elementos de Contorno*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, Abril 2008. Citado na página 20.
- GUEDES, T. da S. *Modelagem e Medições de Campos Elétricos e Magnéticos em Linhas de Transmissão*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Abril 2011. Citado na página 20.
- GUIMARÃES, G. E. *Medições e Cálculos de Campos Elétricos e Magnéticos de Uma Linha de Transmissão de 500kV*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, maio 2005. Citado 4 vezes nas páginas 10, 20, 37 e 38.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON NON IONIZING RADIATION PROTECTION. *Guidelines for Limiting Exposure to Time Varying Electric and Magnetic Fields: 1 hz to 100 khz*. [S.l.], 2010. 19 p. Citado 3 vezes nas páginas 20, 34 e 35.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC61786-1998: Measurement of low-frequency magnetic and electric fields with regard to exposure of human beings - special requirements for instruments and guidance for measurements*. [S.l.], 1998. Citado na página 34.
- JANSON, S.; MIDDENDORF, M. A hierarchical swarm optimizer and its adaptive variant. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, IEEE Press, p. 1272–1282, 2005. Citado na página 44.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. *Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, IEEE Press, p. 1942–1948, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 42.
- LEE, K. Y.; EL-SHARKAWI, M. A. (Ed.). *Modern Heuristic Optimization Techniques: Theory and applications to power systems*. [S.l.]: John Wiley And Sons, 2008. Citado na página 20.
- LI, Z. *Eletromagnetic Sensors for Measurements on Electric Power Transmission Lines*. Tese (Doutorado) — Washington State University, Washington, USA, August 2011. Citado na página 20.

- MENDES, R.; KENNEDY, J.; NEVES, J. The fully informed particle swarm: simpler, maybe better. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, IEEE Press, p. 204–210, 2004. Citado na página 53.
- MOREIRA, R. O. C. *Avaliação Teórico-Experimental de Campos Magnéticos nas Proximidades das Linhas de Transmissão Subterrâneas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Setembro 2011. Citado na página 20.
- NAZARÉ, F. de; WERNECK, M. Temperature and current monitoring system for transmission lines using power-over-fiber technology. *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, IEEE Press, p. 779–784, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 21.
- NISHIYAMA, E. et al. Development of monitoring equipment of currents and voltages of power-transmission lines. *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES*, p. 2310–2315, 2002. Citado na página 39.
- OCA, M. A. M. de; STUTZLE, T. Convergence behavior of the fully informed particle swarm optimization algorithm. *Proceedings of the 10th annual conference on Genetic and evolutionary computation*, p. 71–78, 2004. Citado na página 54.
- OLIVEIRA, C. M. F. de. *Recapitação de Linhas de Transmissão*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, abril 2000. Citado na página 38.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Conheça o Sistema*. 2015. Disponível em: <http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx>. Citado 3 vezes nas páginas 10, 17 e 18.
- PARSOPOULOS, K. E.; VRAHATIS, M. N. *Particle Swarm Optimization and Intelligence: Advances and Applications*. [S.l.]: Information Science Reference, 2010. Citado 5 vezes nas páginas 40, 41, 43, 55 e 69.
- PERAM, T.; VEERAMACHANENI, K.; MOHAN, C. Fitness-distance-ratio based particle swarm optimization. *Proceedings of the IEEE Swarm Intelligence Symposium*, IEEE Press, p. 174–181, 2003. Citado na página 48.
- PINHEIRO, M. G. *Análise de Sensibilidade de Parâmetros Elétricos de Linhas de Transmissão no Domínio da Frequência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, Novembro 2005. Citado na página 38.
- PORTAL BRASIL. *Infraestrutura*. 2015. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/12/rede-de-transmissao-supera-107-mil-quilometros>>. Citado na página 17.
- REYNOLDS, C. Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model. *Computer Graphics*, v. 21(4), p. 25–34, 1987. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.
- ROCHA, L. de C. *Desempenho de Linhas de Transmissão EAT e UAT Frente a Descargas Atmosféricas: Influência da Ruptura a Meio de Vão*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Belo Horizonte - MG, Março 2009. Citado na página 38.

SANTIAGO, N. H.; PORTELA, C. M. Modelagem do efeito corona em linhas de transmissão considerando interação entre fases ou entre pólos e cabos pára-raios. *XI SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 1991. Citado na página 38.

SHI, Y.; EBERHART, R. A modified particle swarm optimizer. *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation*, IEEE Press, p. 69–73, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 49.

SOUZA, C. J. *Determinação da Largura de Faixa de Segurança de Linhas de Transmissão: Um Estudo Paramétrico*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Dezembro 2012. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 37.

SOUZA, L. et al. Sensor a fibra Óptica lpg aplicado à linha de transmissão de energia. *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática*, SBA, p. 2660–2663, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 21.

SUN, X. et al. Noncontact operation-state monitoring technology based on magnetic-field sensing for overhead high-voltage transmission lines. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, v. 28-4, 2013. Citado na página 20.

TAESA; FINATEC. *Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas Aplicadas a Linhas de Transmissão*. 1. ed. Brasília, DF: Goya Editora, 2010. Citado na página 21.

TALBI, E.-G. *Metaheuristics: From design to implementation*. 1. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons, 2009. Citado na página 65.

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELETRONICS ENGINEERS. *IEEE std644-1994: Ieee standard procedures for measurement of power frequency electric and magnetic fields from ac power lines*. New York, USA, 1994. 31 p. Citado na página 34.

VENTER, G.; SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI, J. Multidisciplinary optimization of a transport aircraft wing using particle swarm optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, v. 26(1-2), p. 121–131, 2003. Citado na página 48.

WENDHAUSEN, M. *Desenvolvimento de Um Sistema de Medição de Corrente Elétrica para Aplicação em Linhas de Transmissão de Alta Tensão*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, Abril 2011. Citado na página 39.

YOSHIDA, H. et al. A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment. *IEEE Trans Power Systems*, p. 1232–1239, 2000. Citado na página 20.

Apêndices

APÊNDICE A – Procedimentos observados na medição dos campos nas locações definidas

A.1 Medição do campo elétrico

Para o campo elétrico, o equipamento de medição que foi utilizado dispunha de uma sonda externa a ser conectada ao módulo base por meio de uma fibra óptica. A sonda é fixada sobre um tripé com altura ajustável e que possui um medidor de nível de terreno para ajuste de inclinação. O operador, então, posicionou o tripé, ponto a ponto, e executa a medição. O número de pontos a serem medidos, conforme já esclarecido anteriormente, é dependente da largura da faixa de servidão da LT.

Como o campo elétrico pode ser distorcido pela presença de objetos próximos, o que inclui o corpo humano, a cada medição o operador deve manter a distância mínima recomendada para não afetar os resultados da medição. O manual do equipamento utilizado recomenda a distância de 2,5 m.

A tensão de carga da LT, e portanto seu campo elétrico, não sofre significativa variação durante o dia, e, portanto, o tempo gasto entre o início e fim da medição não é relevante para influenciar os resultados.

Os resultados das medições foram baixados do medidor para o notebook por meio de um software que acompanha o equipamento.

A.2 Medição de campo magnético

O equipamento não dispunha de uma sonda externa para o campo magnético, sendo a medição executada pelo próprio módulo básico que dispõe de um sensor interno de campo magnético.

O módulo básico foi fixado sobre o tripé. O campo magnético não é distorcido pela presença do operador, e, portanto, foi possível operá-lo diretamente, sem distanciamento do operador.

O operador posiciona o tripé, ponto a ponto, e dispara a medição no equipamento. É importante observar que a corrente, e portanto, o campo magnético, varia bastante durante o dia. Desse modo, é desejável que a medição completa do campo magnético, desde o primeiro

ponto até o último, seja realizada com a maior brevidade possível, evitando-se assim, inconformidades nos resultados que possam ser causados pela variação da corrente entre o início e fim da medição.

Do mesmo modo, os resultados das medições foram baixados do medidor para um notebook com o auxílio de um software que acompanha o equipamento.

APÊNDICE B – Medidor de campo utilizado nas medições

O medidor utilizado foi o EFA 200-300, composto de um módulo básico e de uma sonda de medição de campo elétrico, ajustado conforme segue.

- Modo de operação: Intensidade de campo. Essa opção determina que o que se deseja é medir a intensidade de campo;
- Filtro de frequência: O filtro de frequência garante que a medição do campo esteja associado a uma faixa ou frequência desejada. Para as medições nesta dissertação, foi ajustado para a frequência de 60 Hz;
- Modo de detecção: RMS. Calcula o valor RMS resultante dos valores dos 3 eixos do medidor (medição isotrópica);
- Modo de visualização: MAX. Corresponde à medição do valor máximo do campo;
- Organização de memória: Matriz. Nessa opção, define-se uma matriz onde serão guardados os valores referentes a uma medição, descrevendo um mapa de coordenadas dos pontos medidos, facilitando a posterior manipulação das medições;
- Escala: modo automático. Define automaticamente a escala de valores para a medição;
- Tipo de campo: Elétrico ou Magnético, conforme o caso.

O medidor é mostrado na Figura 28.



(a) Detalhe da unidade básica



(b) Unidade básica com a sonda de campo elétrico acoplada sobre tripé

Figura 28 – Detalhe do EFA 200/300 - Analisador de campos eletromagnéticos em baixa frequência.

Anexos

ANEXO A – Dados de medição de campos elétrico e magnético da LT 01

Tabela 15 – Dados de medição de campo elétrico da LT 02 baixados do medidor EFA 200/300

MEM#	D	PROBE	CHN	MODE	DATE	FILTER	DET
4	M	EF_PRB	ALL	FST	21/8/2015	BP60,0Hz	RMS
N	X	Y	Z	TIME	MAX	VALUE[V/m]	VALID
1	20	0	0	18:49:04	MAX	8,04E+02	OK
2	19	0	0	18:49:22	MAX	8,77E+02	OK
3	18	0	0	18:49:40	MAX	9,49E+02	OK
4	17	0	0	18:49:58	MAX	1,01E+03	OK
5	16	0	0	18:50:15	MAX	1,08E+03	OK
6	15	0	0	18:50:33	MAX	1,14E+03	OK
7	14	0	0	18:50:52	MAX	1,19E+03	OK
8	13	0	0	18:51:06	MAX	1,24E+03	OK
9	12	0	0	18:51:24	MAX	1,29E+03	OK
10	11	0	0	18:51:43	MAX	1,31E+03	OK
11	10	0	0	18:52:07	MAX	1,31E+03	OK
12	9	0	0	18:52:24	MAX	1,28E+03	OK
13	8	0	0	18:52:38	MAX	1,24E+03	OK
14	7	0	0	18:52:53	MAX	1,18E+03	OK
15	6	0	0	18:53:06	MAX	1,09E+03	OK
16	5	0	0	18:53:24	MAX	9,97E+02	OK
17	4	0	0	18:53:41	MAX	8,86E+02	OK
18	3	0	0	18:53:55	MAX	7,80E+02	OK
19	2	0	0	18:54:11	MAX	6,77E+02	OK
20	1	0	0	18:54:29	MAX	6,10E+02	OK
21	0	0	0	18:54:43	MAX	5,93E+02	OK
22	-1	0	0	18:54:59	MAX	6,27E+02	OK
23	-2	0	0	18:55:14	MAX	7,10E+02	OK
24	-3	0	0	18:55:31	MAX	8,25E+02	OK
25	-4	0	0	18:55:50	MAX	9,57E+02	OK
26	-5	0	0	18:56:05	MAX	1,09E+03	OK
27	-6	0	0	18:56:23	MAX	1,20E+03	OK
28	-7	0	0	18:56:38	MAX	1,29E+03	OK
29	-8	0	0	18:56:59	MAX	1,37E+03	OK
30	-9	0	0	18:57:13	MAX	1,42E+03	OK
31	-10	0	0	18:57:27	LIVE	1,44E+03	OK
32	-11	0	0	18:57:40	MAX	1,45E+03	OK
33	-12	0	0	18:58:00	MAX	1,43E+03	OK
34	-13	0	0	18:58:15	MAX	1,39E+03	OK
35	-14	0	0	18:58:28	MAX	1,33E+03	OK
36	-15	0	0	18:58:43	MAX	1,27E+03	OK
37	-16	0	0	18:59:01	MAX	1,20E+03	OK
38	-17	0	0	18:59:15	MAX	1,12E+03	OK
39	-18	0	0	18:59:31	MAX	1,06E+03	OK
40	-19	0	0	18:59:46	MAX	9,81E+02	OK
41	-20	0	0	19:00:14	MAX	9,06E+02	OK

Tabela 16 – Dados de medição de campo magnético da LT 01 baixados do medidor EFA 200/300

MEM#	D	PROBE	CHN	MODE	DATE	FILTER	DET
3	M	INT_PRB	ALL	FST	21/8/2015	BP60,0Hz	RMS
N	X	Y	Z	TIME	MAX	VALUE[T]	VALID
1	-20	0	0	19:03:45	MAX	1,37E-06	OK
2	-19	0	0	19:04:29	MAX	1,49E-06	OK
3	-18	0	0	19:04:51	MAX	1,59E-06	OK
4	-17	0	0	19:05:01	MAX	1,71E-06	OK
5	-16	0	0	19:05:14	MAX	1,79E-06	OK
6	-15	0	0	19:05:26	MAX	1,93E-06	OK
7	-14	0	0	19:05:38	MAX	2,02E-06	OK
8	-13	0	0	19:05:49	MAX	2,16E-06	OK
9	-12	0	0	19:06:00	MAX	2,30E-06	OK
10	-11	0	0	19:06:11	MAX	2,51E-06	OK
11	-10	0	0	19:06:22	MAX	2,68E-06	OK
12	-9	0	0	19:06:30	MAX	2,84E-06	OK
13	-8	0	0	19:06:40	MAX	3,03E-06	OK
14	-7	0	0	19:06:50	MAX	3,17E-06	OK
15	-6	0	0	19:06:56	MAX	3,33E-06	OK
16	-5	0	0	19:07:02	MAX	3,47E-06	OK
17	-4	0	0	19:07:08	MAX	3,59E-06	OK
18	-3	0	0	19:07:14	MAX	3,70E-06	OK
19	-2	0	0	19:07:20	MAX	3,76E-06	OK
20	-1	0	0	19:07:27	MAX	3,79E-06	OK
21	0	0	0	19:07:33	MAX	3,83E-06	OK
22	1	0	0	19:07:42	MAX	3,79E-06	OK
23	2	0	0	19:07:54	MAX	3,76E-06	OK
24	3	0	0	19:08:03	MAX	3,74E-06	OK
25	4	0	0	19:08:10	MAX	3,61E-06	OK
26	5	0	0	19:08:20	MAX	3,48E-06	OK
27	6	0	0	19:08:30	MAX	3,34E-06	OK
28	7	0	0	19:08:37	MAX	3,18E-06	OK
29	8	0	0	19:08:43	MAX	3,02E-06	OK
30	9	0	0	19:08:51	MAX	2,84E-06	OK
31	10	0	0	19:08:56	MAX	2,68E-06	OK
32	11	0	0	19:09:04	MAX	2,51E-06	OK
33	12	0	0	19:09:15	MAX	2,35E-06	OK
34	13	0	0	19:09:23	MAX	2,22E-06	OK
35	14	0	0	19:09:30	MAX	2,06E-06	OK
36	15	0	0	19:09:36	MAX	1,93E-06	OK
37	16	0	0	19:09:43	MAX	1,81E-06	OK
38	17	0	0	19:09:51	MAX	1,69E-06	OK
39	18	0	0	19:09:58	MAX	1,59E-06	OK
40	19	0	0	19:10:04	MAX	1,48E-06	OK
41	20	0	0	19:10:12	MAX	1,39E-06	OK

ANEXO B – Dados de medição de campos elétrico e magnético da LT 02

Tabela 17 – Dados de medição de campo elétrico da LT 02 baixados do medidor EFA 200/300

MEM#	D	PROBE	CHN	MODE	DATE	FILTER	DET
2	M	EF_PRB	ALL	FST	21/8/2015	BP60,0Hz	RMS
N	X	Y	Z	TIME	MAX	VALUE[V/m]	VALID
1	16	0	0	17:30:59	MAX	2,10E+03	OK
2	15	0	0	17:31:51	MAX	2,42E+03	OK
3	14	0	0	17:32:22	MAX	2,69E+03	OK
4	13	0	0	17:32:55	MAX	3,01E+03	OK
5	12	0	0	17:33:32	MAX	3,28E+03	OK
6	11	0	0	17:33:59	MAX	3,51E+03	OK
7	10	0	0	17:34:27	MAX	3,64E+03	OK
8	9	0	0	17:35:11	MAX	3,66E+03	OK
9	8	0	0	17:35:49	MAX	3,53E+03	OK
10	7	0	0	17:36:21	MAX	3,32E+03	OK
11	6	0	0	17:36:51	MAX	3,12E+03	OK
12	5	0	0	17:37:26	MAX	2,85E+03	OK
13	4	0	0	17:37:57	MAX	2,63E+03	OK
14	3	0	0	17:38:31	MAX	2,65E+03	OK
15	2	0	0	17:39:06	MAX	2,80E+03	OK
16	1	0	0	17:39:39	MAX	2,97E+03	OK
17	0	0	0	17:40:15	MAX	3,05E+03	OK
18	-1	0	0	17:40:41	MAX	3,00E+03	OK
19	-2	0	0	17:41:10	MAX	2,90E+03	OK
20	-3	0	0	17:41:56	MAX	2,73E+03	OK
21	-4	0	0	17:42:26	MAX	2,67E+03	OK
22	-5	0	0	17:42:53	MAX	2,78E+03	OK
23	-6	0	0	17:43:17	MAX	3,06E+03	OK
24	-7	0	0	17:43:37	MAX	3,39E+03	OK
25	-8	0	0	17:43:56	MAX	3,73E+03	OK
26	-9	0	0	17:44:12	MAX	4,00E+03	OK
27	-10	0	0	17:44:29	MAX	4,09E+03	OK
28	-11	0	0	17:44:47	MAX	3,95E+03	OK
29	-12	0	0	17:45:04	MAX	3,73E+03	OK
30	-13	0	0	17:45:19	MAX	3,43E+03	OK
31	-14	0	0	17:45:44	MAX	3,04E+03	OK
32	-15	0	0	17:46:04	MAX	2,61E+03	OK
33	-16	0	0	17:46:22	MAX	2,24E+03	OK

Tabela 18 – Dados de medição de campo magnético da LT 02 baixados do medidor EFA 200/300

MEM#	D	PROBE	CHN	MODE	DATE	FILTER	DET
2	M	INT_PRB	ALL	FST	21/8/2015	BP60,0Hz	RMS
N	X	Y	Z	TIME	MAX	VALUE[T]	VALID
1	-16	0	0	17:58:36	MAX	2,88E-06	OK
2	-15	0	0	17:58:44	MAX	3,15E-06	OK
3	-14	0	0	17:58:55	MAX	3,48E-06	OK
4	-13	0	0	17:59:07	MAX	3,82E-06	OK
5	-12	0	0	17:59:18	MAX	4,23E-06	OK
6	-11	0	0	17:59:28	MAX	4,79E-06	OK
7	-10	0	0	17:59:40	MAX	5,20E-06	OK
8	-9	0	0	17:59:55	MAX	5,67E-06	OK
9	-8	0	0	18:00:04	MAX	6,05E-06	OK
10	-7	0	0	18:00:14	MAX	6,42E-06	OK
11	-6	0	0	18:00:22	MAX	6,70E-06	OK
12	-5	0	0	18:00:36	MAX	6,90E-06	OK
13	-4	0	0	18:00:45	MAX	7,02E-06	OK
14	-3	0	0	18:00:57	MAX	7,13E-06	OK
15	-2	0	0	18:01:10	MAX	7,24E-06	OK
16	-1	0	0	18:01:19	MAX	7,33E-06	OK
17	0	0	0	18:01:27	MAX	7,28E-06	OK
18	1	0	0	18:01:36	MAX	7,32E-06	OK
19	2	0	0	18:01:44	MAX	7,34E-06	OK
20	3	0	0	18:01:52	MAX	7,36E-06	OK
21	4	0	0	18:02:00	MAX	7,32E-06	OK
22	5	0	0	18:02:07	MAX	7,26E-06	OK
23	6	0	0	18:02:15	MAX	7,10E-06	OK
24	7	0	0	18:02:21	MAX	6,91E-06	OK
25	8	0	0	18:02:31	MAX	6,63E-06	OK
26	9	0	0	18:02:47	MAX	6,73E-06	OK
27	10	0	0	18:03:02	MAX	5,61E-06	OK
28	11	0	0	18:03:16	MAX	5,09E-06	OK
29	12	0	0	18:03:25	MAX	4,91E-06	OK
30	13	0	0	18:03:33	MAX	4,45E-06	OK
31	14	0	0	18:03:42	MAX	3,95E-06	OK
32	15	0	0	18:03:49	MAX	3,58E-06	OK
33	16	0	0	18:04:07	MAX	3,24E-06	OK