

PROJETO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO CONFIÁVEIS PARA EFEITO DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO

Departamento de Engenharia Elétrica - EESC - USP
Prof.: João Bosco A. London Junior
E-mail: jbalj@sc.usp.br

1. Introdução

- O primeiro passo para obter sucesso no processo de Estimação de Estado (EE) em Sistemas Elétricos de Potência (SEP) é a obtenção de um Sistema de Medição Confiável (SMC)

1. Introdução

- **Sistema de Medição Confiável (SMC):**
1. Observabilidade e confiabilidade: o número, tipo e localização dos medidores e das Unidades Terminais Remotas (UTR) instaladas devem garantir a observabilidade do sistema mesmo com a perda simultânea de 1 ou 2 medidas quaisquer, ou, até mesmo, com a perda de uma UTR qualquer;

1. Introdução

- **Sistema de Medição Confiável (SMC):**
1. Observabilidade e confiabilidade: o número, tipo e localização dos medidores e das **Unidades Terminais Remotas** (UTR) instaladas devem garantir a observabilidade do sistema mesmo com a perda simultânea de 1 ou 2 medidas quaisquer, ou, até mesmo, com a perda de uma UTR qualquer;

UTR é um equipamento eletrônico responsável pela transmissão, do ponto de medição ao centro de operação, de uma determinada quantidade de medidas

1. Introdução

■ Sistema de Medição Confiável (SMC):

1. Observabilidade e confiabilidade: o número, tipo e localização dos medidores e das Unidades Terminais Remotas (UTR) instaladas devem garantir a observabilidade do sistema mesmo com a perda simultânea de 1 ou 2 medidas quaisquer, ou, até mesmo, com a perda de uma UTR qualquer;

2. Detecção e identificação de medidas com erros grosseiros: o nível de redundância das medidas disponíveis deve ser tal que garanta a ausência de medidas críticas (MCs); de conjuntos críticos de medidas (CCMs)

1. Introdução

■ Sistema de Medição Confiável (SMC):

“Um sistema de medição é considerado confiável se ele for observável e não possuir MCs, CCMs e UTRs críticas”

1. Introdução

■ Uma UTR é crítica se a eliminação de todas as medidas, transmitidas pela mesma, fizer um SEP observável tornar-se não observável

✓ Deve-se destacar que, mesmo não contendo medida crítica, uma UTR pode ser crítica. Considerando, por exemplo, uma UTR possuindo p medidas não críticas, se o sistema tornar-se não observável com a retirada dessas p medidas, essa UTR é crítica

1. Introdução

■ Diversos métodos para projeto e fortalecimento de sistemas de medição têm sido desenvolvidos

1. Introdução

- Método que se baseia na análise da matriz H_{Δ}^t , que é obtida através de um processo de fatoração triangular da matriz Jacobiana (London Jr. et al, 2002)
 - Vantagem: permite a determinação das UTRs críticas de forma mais direta, em relação aos outros métodos já desenvolvidos para o mesmo fim
 - Entretanto, não objetiva a questão de **tornar mínimo o custo do sistema de medição**, que é um parâmetro de suma importância para as empresas, devido às suas restrições orçamentárias

1. Introdução

- Projetar um SMC pode ser visto como um problema de otimização onde **os gastos com investimentos** devem ser minimizados, enquanto **certos critérios técnicos devem ser observados**
 - Em razão de se tratar de um **problema combinatorial** com **um grande número de soluções possíveis**, não se dispõe de ferramentas analíticas eficientes para a sua solução

1. Introdução

- Projetar um SMC pode ser visto como um problema de otimização onde **os gastos com investimentos** devem ser minimizados, enquanto **certos critérios técnicos devem ser observados**
 - Em razão de se tratar de um **problema combinatorial** com **um grande número de soluções possíveis**, não se dispõe de ferramentas analíticas eficientes para a sua solução
 - Metodologias para projeto e fortalecimento de SMCs baseadas na aplicação de meta heurística

1. Introdução

- Metodologias para projeto e fortalecimento de sistemas de medição baseadas na aplicação de meta heurística:
 - Em (Souza et al, 2005) foi desenvolvida uma metodologia que utiliza Algoritmo Genético (AG) para obter uma dependência entre o custo do sistema de medição e o atendimento de alguns requisitos de confiabilidade (observabilidade e ausência de MCs e de CCMs). Fazendo uso de uma função aptidão flexível, tal metodologia considera a possibilidade de o sistema em análise possuir diferentes topologias, em decorrência da mudança de estados de chaves e disjuntores. Porém, tal metodologia não considera a possibilidade de existirem UTRs críticas
 - Coser et al (2006) utilizaram técnicas de Algoritmos Evolutivos para ponderar entre o custo e a redundância de medidas e UTRs

2. Vigliassi et al (2007)

- Com fundamento no método proposto por London Jr. et al (2002), que se baseia na análise da matriz H_A^t , em (Vigliassi et al, 2007) **desenvolveu-se uma metodologia para projeto e fortalecimento de sistemas de medição**, levando em consideração não apenas **os critérios técnicos**, listados previamente, mas também o **custo associado à instalação de medidores e UTRs**
 - Pela análise da estrutura da **matriz H_A^t** a metodologia proposta possibilitará a obtenção de sistemas de medição confiáveis (SMC)
 - Um **Algoritmo Evolutivo (AE)** é desenvolvido para encontrar o SMC com o custo mínimo de investimento

Referência

- VIGLIASSI, M. P. ; Moreira, E.M. ; A. C. B. Delbem; SIMOES, E. V. ; LONDON Jr., J.B. A. ; Bretas, N. G.. Metodologia para Projeto de sistemas de medição para efeito de estimação de estado via algoritmos Evolutivos. In: V Seminário Nacional de Controle e Automação, 2007, Salvador. Anais (CD - artigo: TT067; 6 páginas).

2. Vigliassi et al (2007)

- A metodologia para projeto e fortalecimento de sistemas de medição proposta em (Vigliassi et al, 2007), foi a primeira tentativa de obtenção de um metodologia baseada na matriz H_A^t e em AE
 - Entretanto, tal metodologia perde eficiência em função da busca **em regiões não factíveis**
 - ✓ Em razão da codificação utilizada por essa metodologia, onde cada indivíduo é representado por um "array" binário onde zero indica medidor instalado e um medidor não instalado

2. Vigliassi et al (2007)

- A metodologia proposta em em (Vigliassi et al, 2009) utiliza uma nova codificação, que torna possível a utilização de todas as propriedades da matriz H_A^t , restringindo a busca apenas nas regiões factíveis
- Consequentemente, aumenta a probabilidade de o algoritmo de busca encontrar sistemas de medição confiáveis com menor custo

Referência

- VIGLIASSI, M. P. ; LONDON, J.B. A. ; BRETAS, N.G.; A. C. B. DELBEM. Metering System Planning for State Estimation via Evolutionary Algorithm and Hdelta Matrix. In: IEEE Bucharest PowerTech, 2009, Bucharest. Proceedings (CD; Artigo número 88; 6 páginas).

3. Embasamento Teórico

- Método para fortalecimento e projeto de sistemas de medição via matriz H_{Δ}^t (London Jr. et al (2002))
- Conceitos importantes de Algoritmo Evolutivo (AE)

3. Embasamento Teórico: Método para fortalecimento e projeto de sistemas de medição via matriz H_{Δ}^t

- Considerando o modelo linear, a matriz H_{Δ}^t associada a um sistema observável apresenta a seguinte estrutura (London Jr. et al, 2002):

$$H_{\Delta}^t = \begin{bmatrix} I_{(n-1)} & R \\ 0 & \dots\dots\dots 0 \end{bmatrix}_{(nm)}$$

Sendo:

I - submatriz identidade, de dimensão $(n-1) \times (n-1)$
 R - submatriz de dimensão $(n-1) \times [m-(n-1)]$
 n - número de barras do sistema
 m - número de medidas

3. Embasamento Teórico: Método para fortalecimento e projeto de sistemas de medição via matriz H_{Δ}^t

- Considerando o modelo linear, a matriz H_{Δ}^t apresenta a seguinte estrutura (London Jr. et al, 2002):

$$H_{\Delta}^t = \begin{bmatrix} I_{(n-1)} & R \\ 0 & \dots\dots\dots 0 \end{bmatrix}_{(m \times (n-1))}$$

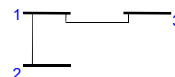
- A matriz H_{Δ}^t é obtida através de um processo de fatoração triangular da matriz Jacobiana transposta (H^t)
- A partir desse processo de fatoração triangular da matriz H^t é possível a obtenção de SMC (London Jr. et al, 2002)

3. Embasamento Teórico: Método para fortalecimento e projeto de sistemas de medição via matriz H_{Δ}^t

- Possibilidades para fortalecimento de um sistema de medição já existente:
 - Através da seleção e instalação de medidas candidatas: consiste na instalação de medidores novos, em subestações que já possuem UTRs e alguns medidores
 - Através da seleção e instalação de UTRs candidatas: consiste na instalação de UTRs e de medidores, em subestações previamente desprovidas desses equipamentos
- Possui 3 fases distintas, que se baseiam na obtenção e análise da matriz H_{Δ}^t
 - O primeiro passo é a obtenção da matriz Jacobiana transposta (H^t) a partir de uma lista contendo todos os medidores candidatos (relação medidor candidato – UTR candidata)
 - A coluna i da matriz H^t corresponde ao medidor i da lista

3. Embasamento Teórico: Método para fortalecimento e projeto de sistemas de medição via matriz H_{Δ}^t

Exemplo:



Lista de medidas candidatas: F_{1-2} , F_{2-1} , F_{1-3} , F_{3-1} , I_1 , I_2 , I_3
 UTR_1 , UTR_2 , UTR_1 , UTR_3 , UTR_1 , UTR_2 , UTR_3

$$H^t = \begin{matrix} & \begin{matrix} F_{1-2} & F_{2-1} & F_{1-3} & F_{3-1} & I_1 & I_2 & I_3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & -1 & 2 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$H^t \Rightarrow H_{\Delta}^t$ – Permutação de colunas

3. Embasamento Teórico: Método para fortalecimento e projeto de sistemas de medição via matriz H_{Δ}^t

- Possui 3 fases distintas, que se baseia na obtenção e análise da matriz H_{Δ}^t
 - Fase 1: Análise e restauração da observabilidade
Sistema Observável
 - Fase 2: Análise e restauração da redundância de medidas
Ausência de MCs e de CCMS
 - Fase 3: Identificando e aumentando a redundância das UTRs críticas
Ausência de UTRs críticas

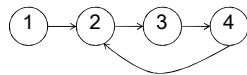
3. Embasamento Teórico: Algoritmos Evolutivos

- Algoritmos Evolutivos (AEs) são baseados no processo de evolução natural, onde atributos encontrados em sistemas biológicos têm seus correspondentes em modelos computacionais particularmente projetados para simular tais processos
- Durante a execução dos AEs as soluções evoluem, como na teoria de Darwin, onde os indivíduos melhores adaptados sobrevivem e geram seus descendentes
- AEs vêm apresentando bons resultados para tratamento de problemas combinatoriais com um grande número de soluções possíveis (embora não se possa garantir a obtenção do ótimo global)

3. Embasamento Teórico: Algoritmos Evolutivos

■ Tarefas realizadas pelos AEs:

1. Inicializar população - cada indivíduo da população representa um candidato à solução de um dado problema (*cromossomo*)
2. Avaliar aptidão – verificar o valor de adequação de cada indivíduo, mostrando o quão próximo está esse valor da solução procurada
3. Seleção dos indivíduos melhores adaptados (Roleta e Elitismo)
4. Criação de novos indivíduos (Cruzamento e Mutação)



4. Metodologia Proposta

- A metodologia proposta em (Vigliassi et al, 2009) pode ser utilizada tanto para o projeto de um sistema de medição novo e confiável, quanto para análise e fortalecimento de um sistema de medição já existente

4. Metodologia Proposta

- A metodologia proposta em (Vigliassi et al, 2009) faz uso do método desenvolvido por London Jr. et al (2002), que se baseia na obtenção e análise da matriz H_A^t

- Tal método possibilita a obtenção de um sistema de medição confiável, a partir **da análise de uma lista** contendo todos os medidores candidatos a serem instalados em um sistema, com a indicação da correspondente UTR candidata
- **Analisando essa lista, o método seleciona os medidores e UTRs que devem ser instalados**, para obtenção de um sistema de medição confiável
 - ✓ Isso é realizado através da **obtenção e análise da matriz H_A^t**
- **Dependendo da sequência com que os medidores candidatos estão dispostos na lista**, o método fornece confiáveis sistemas de medição **selecionando, para instalação, números distintos de medidores e UTRs**

4. Metodologia Proposta

- A metodologia proposta em (Vigliassi et al, 2009) faz uso do método desenvolvido por London Jr. et al (2002), que se baseia na obtenção e análise da matriz H_A^t

- Em razão de o **custo de um sistema de medição depender do número de medidores e UTRs instalados**, a ideia da metodologia proposta em (Vigliassi et al, 2009) é a seguinte:

4. Metodologia Proposta

- A metodologia proposta em (Vigliassi et al, 2009) faz uso do método desenvolvido por London Jr. et al (2002), que se baseia na obtenção e análise da matriz H_A^t

Passo 1: Geram-se diversas listas (indivíduos) contendo todos os medidores candidatos, sendo que, em cada uma das listas, esses medidores aparecem em uma ordem distinta

Passo 2: Cada uma das listas (indivíduos), geradas no passo anterior, é analisada pelo método proposto por London Jr. et al (2002), que fornece, como resultado, o número de medidores e UTRs que devem ser instalados para obtenção de um **sistema de medição confiável**

✓ De acordo com esse número de medidores e UTRs **calcula-se o custo do sistema de medição obtido** (função de aptidão), que será o parâmetro a ser analisado para definir a solução "ótima" do problema, isto é, para definir qual das listas (indivíduo) possibilitou a obtenção do **sistema de medição confiável de menor custo**

4. Metodologia Proposta

- Na metodologia proposta em (Vigliassi et al, 2009), o AE vai possibilitar a obtenção de um sistema de medição de baixo custo, "**otimizando**" a **sequência** com que as medidas candidatas serão analisadas pelo método proposto por London Jr. et al (2002)

4. Metodologia Proposta

- A representação do AE utilizada na metodologia proposta em (Vigliassi et al, 2009) é a seguinte:

➤ **Cromossomo:** cada indivíduo é um array, cujas posições correspondem a cada um dos medidores possíveis de serem instalados no sistema

✓ A diferença entre os indivíduos é a sequência com que os medidores estão ordenados no array

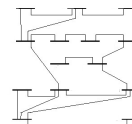
✓ O tamanho de cada um dos indivíduos é igual ao número total de medidores possíveis de serem instalados no sistema (m_{total})

4. Metodologia Proposta

- A representação do AE utilizada na metodologia proposta em (Vigliassi et al, 2009) é a seguinte:

➤ **Cromossomo:** cada indivíduo é um array, cujas posições correspondem a cada um dos medidores possíveis de serem instalados no sistema

✓ Tomando como exemplo o sistema IEEE de 14 barras o cromossomo seria representado por um array de 52 posições, onde 38 seriam medidores de fluxo (dois em cada linha) e 14 de injeção (um em cada barra)



Cromossomo: [Medidor 1 | Medidor 14 | (...) | Medidor m_{total}]

4. Metodologia Proposta

▪ A representação do AE utilizada na metodologia proposta em (Vigliassi et al, 2009) é a seguinte:

- **População:** a população é de tamanho fixo e não se altera durante a execução do AE

4. Metodologia Proposta

▪ A representação do AE utilizada na metodologia proposta em (Vigliassi et al, 2009) é a seguinte:

- **Função de avaliação (fitness):** o correto funcionamento de um AE depende principalmente da determinação dessa função. Neste trabalho ela é definida da seguinte forma:

$$f = cm * numMed + cutr * numUtr$$

Onde:

cm = custo do medidor
numMed = número de medidores instalados
cutr = custo da UTR
numUtr = número de UTRs instaladas

- ✓ Não são atribuídas penalidades para não observância dos requisitos de confiabilidade de um sistema de medição. Isto em razão de todos os indivíduos possibilitarem o atendimento de todos aqueles quesitos (são SMC)

4. Metodologia Proposta

▪ A representação do AE utilizada na metodologia proposta em (Vigliassi et al, 2009) é a seguinte:

- **Seleção:** os indivíduos são selecionados através do Elitismo. Dessa maneira, com certeza, os melhores indivíduos de cada geração sobrevivem
- **Operadores genéticos:** para a reprodução dos indivíduos foi utilizado o crossover com um ponto (metade do cromossomo)
 - ✓ Esse será o ponto de separação utilizado pelo crossover para gerar os novos indivíduos, segundo a sequência abaixo:

Pai A 1 2

Pai B 3 4

Filho A 1 4

Filho B 3 2

4. Metodologia Proposta

▪ A representação do AE utilizada na metodologia proposta em (Vigliassi et al, 2009) é a seguinte:

- **Seleção:** os indivíduos são selecionados através do Elitismo. Dessa maneira, com certeza, os melhores indivíduos de cada geração sobrevivem
- **Operadores genéticos:** para a reprodução dos indivíduos foi utilizado o crossover com um ponto (metade do cromossomo)
 - ✓ Esse será o ponto de separação utilizado pelo crossover para gerar os novos indivíduos, segundo a sequência abaixo:

Pai A 1 2

Pai B 3 4

Filho A 1 4

Filho B 3 2

- Os melhores resultados foram encontrados realizando o crossover entre o melhor indivíduo da população e todos os demais

5. Testes e Análise dos Resultados

- Para os testes realizados considerou-se a possibilidade de instalação de uma UTR por barra
- Os custos de medidores e UTRs utilizados neste artigo são os mesmos considerados em (Coser et al, 2006; Baran et al, 1995), isto é, 4,50 e 100,00 unidades monetárias (UM) para medidores e UTRs, respectivamente

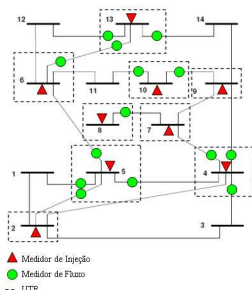
5. Testes e Análise dos Resultados

- A resultados encontrados para os sistemas de 6, 14 e 30 barras do IEEE, durante **200 gerações** e com população de 20 indivíduos

Barras	Medidores		Tempo (seg)	UTRs	Custo (UM)
	Fluxo	Injeção			
6	6	5	5	5	549,50
14	14	9	15	9	1.003,50
30	33	20	63	21	2.338,50

5. Testes e Análise dos Resultados

- A solução encontrada para o sistema de 14 barras do IEEE



5. Testes e Análise dos Resultados

- Comparação dos resultados obtidos por três métodos diferentes para projeto e fortalecimento de sistemas de medição, aplicados ao sistema de 14 barras do IEEE

	Medidores		UTRs	Custo (UM)
	Fluxo	Injeção		
Coser et al (2006)	9	7	10	1.072,00
Vigliassi et al (2007)	9	7	11	1.172,00
Vigliassi et al (2009)	14	9	9	1.003,50

5. Testes e Análise dos Resultados

- Comparação dos resultados obtidos por três métodos diferentes para projeto e fortalecimento de sistemas de medição, aplicados ao sistema de 14 barras do IEEE

	Medidores		UTRs	Custo (UM)
	Fluxo	Injeção		
Coser et al (2006)	9	7	10	1.072,00
Vigliassi et al (2007)	9	7	11	1.172,00
Vigliassi et al (2009)	14	9	9	1.003,50

Preferência para locação de medidas candidatas e não UTRs candidatas

5. Testes e Análise dos Resultados

- A nova forma de codificação do AE, aliada à análise da matriz H_A^t , permite alcançar os resultados esperados **em poucas gerações**, visto que todos os indivíduos gerados atendem aos requisitos de confiabilidade de um sistema de medição (observabilidade e ausência de MC, CCM e UTR crítica)

	População	Gerações
Coser et al (2006)	150	8.673
Vigliassi et al (2007)	40	300
Vigliassi et al (2009)	40	200

6. Extensões

- Na dissertação de mestrado do estudante Alex Bozz a metodologia proposta em Vigliassi et al (2009) foi estendida para possibilitar o projeto e fortalecimento de sistemas de medição híbridos (sistemas considerando a presença de medidas SCADA e medidas fasoriais sincronizadas). Uma heurística construtiva foi também desenvolvida nesse trabalho, possibilitando a obtenção de sistemas de medição confiáveis de menor custo

6. Extensões

- Tese de doutorado do estudante Marcos Vigliassi (2017):** com base nos trabalhos baseados na matriz H_A^t já desenvolvidos pelo grupo foi desenvolvido:
 - ✓ Uma formulação multiobjetivo para o problema de projeto de sistemas de medição de uma forma mais ampla, considerando todas requisitos de desempenho que devem ser atendidos para obtenção de um SMC
 - ✓ Uma método para tratamento desse problema, considerando o *trade-off* entre os requisitos de desempenho e o custo, fazendo uso do conceito de Fronteira de Pareto

6. Extensões

- Tese de doutorado do estudante Marcos Vigliassi (2017): com base nos trabalhos baseados na matriz H_A^t já desenvolvidos pelo grupo foi desenvolvido:

- ✓ VIGLIASSI, M. P.; MASSIGNAN, J. A. D.; DELBEM, A. C. B.; London, Jr., J. B. A. Multi-objective evolutionary algorithm in tables for placement of SCADA and PMU considering the concept of Pareto Frontier. INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRICAL POWER & ENERGY SYSTEMS, v. 106, p. 373-382, 2019

PROJETO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO CONFIÁVEIS PARA EFEITO DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO

Departamento de Engenharia Elétrica - EESC - USP
Prof.: João Bosco A. London Junior
E-mail: jbalj@sc.usp.br

46