

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
ÊNFASE EM ELETROTÉCNICA

EDUARDO GODOY FERNANDES

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE DIFERENTES ALGORITMOS DE
DECOMPOSIÇÃO MODAL PARA APLICAÇÕES ENVOLVENDO GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA**



CURITIBA

2018

EDUARDO GODOY FERNANDES

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE DIFERENTES ALGORITMOS DE
DECOMPOSIÇÃO MODAL PARA APLICAÇÕES ENVOLVENDO GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA**

Monografia apresentada como trabalho de conclusão de Curso da disciplina TE105 - Projeto de Graduação, do departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Roman Kuiava.

CURITIBA

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná como requisito à obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. Roman Kuiava

Orientador:

Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Me. Kristie Kaminski Küster

Institutos Lactec

Prof. Dr. Carlos Gabriel Bianchin

Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Curitiba, 04 de dezembro de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, em especial ao meu orientador Prof. Dr. Roman Kuiava que me apoiou e teve paciência comigo durante o processo deste trabalho.

Agradeço ao meu colega Victor Romano Pereira Lourenço, carinhosamente chamado de Sales, que sempre estará em minha memória.

Agradeço aos membros do Diretório Acadêmico de Engenharia Elétrica das gestões 2016, 2017 e 2018 que sempre me apoiaram desde os momentos de alegria até os momentos de tristeza.

Agradeço aos meus pais e familiares que sempre me apoiaram e incentivaram nesses anos de graduação.

Agradeço aos meus amigos e colegas que sempre tiveram próximos a esta longa trajetória.

E por fim, agradeço todos aqueles que me ajudaram de forma direta ou indireta a construir esse caminho até o presente momento.

*“Enquanto houver vontade de lutar
haverá esperança de vencer”*

Agostinho de Hipona

RESUMO

Com o crescimento da geração distribuída no Brasil, é necessário um estudo aprofundado do comportamento dinâmico de redes de distribuição com a presença destes geradores. Um dos fatores que influenciam a estabilidade de sistemas elétricos de potência é a presença de modos eletromecânicos de baixa frequência, que podem ser vistos nas respostas dinâmicas de geradores síncronos a incidência de perturbações. Então, para identificar os modos eletromecânicos na operação em tempo real do sistema são utilizados algoritmos de decomposição modal, que são capazes de decompor um sinal em senoides amortecidas, adquirindo informações como amplitude, frequência e fase de cada componente. Há uma grande variedade de algoritmos de decomposição modal, por isso, faz-se necessário um estudo elaborado sobre comparações de diferentes técnicas, dentre as três mais utilizadas e que são alvo dos estudos deste trabalho: ESPRIT (*Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques*), Prony e por fim MP (*Matrix Pencil*). Dentre os parâmetros que podem ser utilizados para a análise comparativa, foram escolhidos três: o erro entre o sinal real e o sinal estimado, o menor número de componentes para a melhor estimativa possível e por fim, a robustez em relação à presença de ruídos. O trabalho mostra que o erro obtido pelo método MP é inferior aos métodos de Prony e ESPRIT, tanto no teste com ruído sem ruído, sendo este o resultado mais satisfatório.

Palavras-chave: Geração distribuída, decomposição modal, modos eletromecânicos de baixa frequência, estabilidade de ângulo de rotor.

ABSTRACT

With the growth of distributed generation in Brazil, it is necessary to study in depth the stability of electric power systems. One of the factors that influence stability is the presence of electromechanical modes. Electromechanical modes are low-frequency oscillations that can be seen in synchronous generators. Then, to identify electromechanical modes, modal decomposition algorithms are used, which are able to decompose a signal into damped sinusoids, acquiring information such as amplitude, frequency, phase and amplitude of each component. There is a great variety of modal decomposition algorithms, so it is necessary to do an elaborated study on comparisons of different modal decomposition techniques, among the three most used: ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques), Prony and end MP (Matrix Pencil). Among the parameters that can be used, three were chosen: the smallest possible error, the lowest number of components for the best possible estimation and, finally, a greater robustness to noise. The work shows that the error obtained by the MP method is inferior to the methods of Prony and ESPRIT, in the test with noise-free noise, this being the most satisfactory result.

Keywords: Distributed generation, Modal decomposition, Mode eletrometer in low frequency, rotor's angle stability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| FIGURA 2.1 – CLASSIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE POTÊNCIA..... | 15 |
| FIGURA 2.2 – CATEGORIAS DE MÉTODOS DE DECOMPOSIÇÃO MODAL | 18 |
| FIGURA 2.3 – OPERAÇÃO AMBIENTAL E TRANSITÓRIA NO SISTEMA DE ENERGIA | 19 |
| FIGURA 3.1 – DIAGRAMA UNIFILAR SIMPLIFICADO DA REDE ELÉTRICA DO CAMPUS CP DA UFPR..... | 32 |
| FIGURA 4.1 – VELOCIDADE ANGULAR DO ROTOR DO GERADOR NO CENÁRIO 2..... | 36 |
| FIGURA 4.2 – VELOCIDADE ANGULAR DO ROTOR DO GERADOR NO CENÁRIO 2 COM DISTURBIO | 37 |
| FIGURA 4.3 – VELOCIDADE ANGULAR DO ROTOR DO GERADOR NO CENÁRIO 2 APÓS O DISTURBIO..... | 38 |
| FIGURA 4.4 – ESTIMAÇÃO MODAL ESPRIT DO CENÁRIO 2..... | 39 |
| FIGURA 4.5 – ESTIMAÇÃO MODAL PRONY DO CENÁRIO 2 | 41 |
| FIGURA 4.6 – ESTIMAÇÃO MODAL MP DO CENÁRIO 2 | 42 |
| FIGURA 4.7 – GRÁFICO EM BARRAS DE ERROS SEM RUÍDO NO ROTOR DO GERADOR..... | 43 |
| FIGURA 4.8 – GRÁFICO DE BARRAS DO NÚMERO DE COMPONENTES POR MÉTODO..... | 42 |
| FIGURA 4.9 – ESTIMAÇÃO MODAL ESPRIT DO CENÁRIO 2 COM RUÍDO. | 46 |
| FIGURA 4.10 – ESTIMAÇÃO MODAL PRONY DO CENÁRIO 2 COM RUÍDO ... | 47 |
| FIGURA 4.11 – ESTIMAÇÃO MODAL MP DO CENÁRIO 2 COM RUÍDO | 48 |
| FIGURA 4.12 – GRÁFICO EM BARRAS DE ERROS COM RUÍDO NO ROTOR DO GERADOR..... | 42 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| TABELA 3.1 – DADO DAS CARGAS DA REDE ELÉTRICA DO CAMPUS CP DA UFPR..... | 32 |
| TABELA 3.2 – DADOS DE LINHAS E TRANSFORMADORES DA REDE ELÉTRICA DO CAMPUS CP DA UFPR | 33 |
| TABELA 4.1 – DIFERENTES CENÁRIOS INTRODUZIDOS NO SISTEMA | 35 |
| TABELA 4.2 – RELAÇÃO DOS MÉTODOS E OS ERROS SEM RUÍDOS NO ROTOR DO GERADOR..... | 42 |
| TABELA 4.3 – COMPONENTES DO MÉTODO ESPRIT PARA OS CENÁRIO 2 | 44 |
| TABELA 4.4 – COMPONENTES DO MÉTODO PRONY PARA O CENÁRIO 2 | 44 |
| TABELA 4.5 – COMPONENTES DO MÉTODO MP PARA O CENÁRIO 2 | 45 |
| TABELA 4.6 – RELAÇÃO DOS MÉTODOS E OS ERROS COM RUÍDO NO ROTOR DO GERADOR..... | 48 |

LISTA DE SIGLAS

| | | |
|--------|---|---|
| GD | - | Geração Distribuída |
| MW | - | Megawatts |
| SEP | - | Sistema elétrico de Potência |
| Hz | - | Hertz |
| ESPRIT | - | Estimation of signal Parameters via Rotational Invariance Techniques (Estimativa de parâmetros de sinal via técnicas de invariância rotacional) |
| MP | - | Matrix Pencil (Pincel de Matriz) |
| MUSIC | - | Multiple Signal Classification (Classificação de sinal múltiplo) |
| CP | - | Centro Politécnico |
| UFPR | - | Universidade Federal do Paraná |
| kV | - | kilovolts |
| MVAr | - | mega volt-ampere reativo |
| kW | - | kilowatts |
| V | - | Volts |
| MATLAB | - | Matrix Laboratory (Laboratório de Matrizes) |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 Objetivos | 13 |
| 1.1.1 Objetivo Geral | 13 |
| 1.1.2 Objetivos Específicos | 14 |
| 2. ESTABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA | 15 |
| 2.1 Modos de oscilação eletromecânicos | 16 |
| 2.2 Métodos de decomposição modal..... | 17 |
| 2.2.1 ESPRIT | 19 |
| 2.2.2 Prony..... | 23 |
| 2.2.3 MP..... | 26 |
| 3. SISTEMA TESTE | 31 |
| 3.1 Rede de distribuição com geração distribuída em estudo..... | 31 |
| 3.2 Gerador Síncrono..... | 34 |
| 4. TESTES E RESULTADOS | 35 |
| 4.1 Cenários..... | 35 |
| 4.2 Procedimento para aplicação dos métodos de decomposição modal.... | 36 |
| 4.3 Erro | 38 |
| 4.4 Número de componentes | 43 |
| 4.5 Robustez a ruídos | 46 |
| 5. CONCLUSÃO | 50 |
| REFERÊNCIAS | 52 |

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, 68,1% da geração elétrica brasileira provêm da geração de usinas hidrelétricas (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2015). No entanto, apesar das vantagens dos investimentos em hidrelétricas, como alto rendimento nas turbinas, grandes potências e geração de emprego, essas usinas produzem um grande impacto ambiental, devido ao desmatamento de parques naturais, extinção de espécies, consequências sociais e batalhas jurídicas. A partir disso, o Brasil vem investindo em um grande número de fontes de energias alternativas renováveis de baixo impacto ambiental, como painéis solares e parques eólicos, promovendo assim a descentralização da produção de energia e incentivando o desenvolvimento da geração distribuída (GD).

A geração distribuída possui grandes vantagens em relação à geração centralizada de energia. A principal vantagem é trazer os geradores próximos às cargas e aos consumidores, reduzindo as perdas por efeito joule. Além do mais, outra vantagem da GD é a diminuição das dependências das usinas hidrelétricas. Um exemplo do crescimento da geração distribuída é o aumento do número de conexões de micro e mini geração distribuída, que atende mais de 30 mil unidades consumidoras, produzindo quase 250 MW, o suficiente para atender mais de 350 mil residências (ANEEL, 2018).

Embora a geração distribuída apresente grandes vantagens, a principal desvantagem é transformar o circuito no qual antes possuía apenas cargas passivas, passa a ser composta por elementos ativos, influenciando diretamente no fluxo de potência, níveis de tensão, a manutenção, a proteção e a estabilidade do sistema elétrico de potência (SEP) (XAVIER, 2014).

Outra desvantagem associada a geração distribuída é o aumento da complexidade do sistema, abrangendo equipamentos de medida, controle e comando que articulam a operação de geradores de acordo com as ofertas de energias (RIBEIRO; CRUZ, 2017).

Um dos fatores que levam a instabilidade dos sistemas elétricos de potência é a presença de modos eletromecânicos. Os modos são oscilações de

baixa frequência originadas a partir da incidência de pequenas perturbações (como variações de cargas) que, somado a um sistema mal amortecido, podem provocar a perda do sincronismo dos geradores síncronos conectados à rede, incluindo os próprios geradores distribuídos. A origem do termo eletromecânico vem dos modos serem observados como oscilações no ângulo e velocidade nos rotores de geradores síncronos. Os modos oscilatórios são encontrados principalmente na faixa de 0,1 Hz a 6,0 Hz (RAMOS, 2016).

Para identificar os modos eletromecânicos, se utiliza técnicas de decomposição modal. Tais técnicas fazem a separação de um sinal no tempo em uma somatória de senoides amortecidas, obtendo informações como a amplitude, decaimento, frequência e fase de cada senoide, facilitando assim o estudo e a identificação dos modos (FERNANDES, 2012).

Há duas principais categorias de técnicas de estimação modal, *ringdown analysis* e *modemeter algorithm*. A categoria de *ringdown analysis* processa as velocidades angulares dos geradores próximos ao evento da variação da carga, na parte transitória do sinal, enquanto as técnicas pertencentes ao *modemeter algorithm* processa as velocidades angulares dos geradores durante o regime normal de operação (RAMOS, 2016).

Na categoria *ringdown analysis* há uma variedade de métodos que podem ser aplicados nos sinais dos geradores. As principais técnicas são os métodos ESPRIT, Prony e MP. Porém, é necessário um estudo o qual seja capaz de indicar qual método é mais eficaz, utiliza menor quantidade de recursos e mais robusto a ruídos (RAMOS, 2016).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é desenvolver um estudo comparativo entre diferentes técnicas de estimação modal na categoria *ringdown analysis* para estimação de modos eletromecânicos de baixa.

1.1.2 Objetivos Específicos

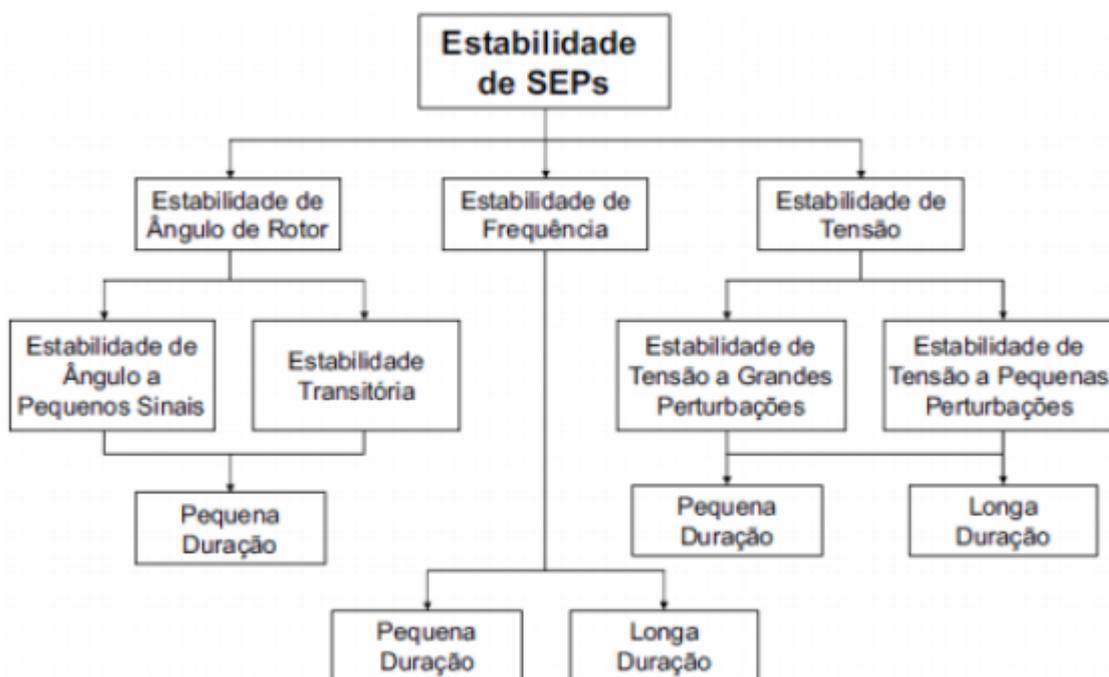
- Concluir a respeito de possíveis vantagens de um método de estimação modal em relação a outro;
- Verificar a aplicabilidade dos algoritmos propostos em um sistema de geração distribuída;
- Apresentar um novo estudo comprovando a eficiência de métodos de decomposição modal para análise de estabilidade angular a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência.

2. ESTABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Primeiramente será apresentado o conceito e classificação de estabilidade de sistemas elétricos de potência (SEP). Então é abordado o conceito de modos eletromecânicos, sendo este o alvo de estudo deste trabalho. Por fim, discute-se a identificação desses modos pela aplicação da decomposição modal, que se divide em duas categorias: *ringdown analysis* e *modemeter algorithm*. Dentro da categoria *ringdown analysis* será mostrado três diferentes tipos de algoritmos: o ESPRIT, Prony e por fim o método Matrix Pencil (MP).

A estabilidade de SEP é definida como sendo a capacidade do sistema de recuperar a sua condição inicial de equilíbrio após um distúrbio ou perturbação (KUNDUR *et. al*, 2004). A estabilidade de SEP pode ser dividida por três vertentes, como indicado na figura 2.1, as quais são a estabilidade de ângulo de rotor, estabilidade de frequência e por fim estabilidade de tensão. O foco deste trabalho está na estabilidade de ângulo de rotor a pequenos sinais (RAMOS, 2016).

FIGURA 2.1 – Classificação da estabilidade de sistemas de potência



FONTE: (KUNDUR *et al*, 2004)

O presente trabalho envolve estudos de estabilidade de ângulo de rotor a pequenas perturbações, o qual se refere à habilidade dos geradores de manter o sincronismo quando o sistema está sujeito a pequenas perturbações caracterizadas principalmente por pequenas variações de cargas (RAMOS, 2016). O estudo de estabilidade angular a pequenas perturbações envolve a análise dos modos eletromecânicos a baixa frequência. Tais modos podem ser estimados a partir do processamento de sinais coletados em tempo real do sistema a uma taxa de amostragem adequada a partir de algoritmos de decomposição modal.

2.1 Modos de oscilação eletromecânicos

O estudo de modos de oscilação eletromecânicos é cada vez mais importante, uma vez que nos últimos anos, houve um aumento da complexidade dos sistemas de potência, principalmente no contexto da geração distribuída, com um crescimento do número de geradores síncronos nos barramentos dos sistemas. À medida que geradores síncronos são inseridos nas redes de distribuição, problemas relacionados às oscilações eletromecânicas tornam-se presentes nessas redes, principalmente quando forem pouco amortecidas (EDWARD *et. al*, 2000). Em tais casos, a qualidade de tensão nas barras de carga, bem como a confiabilidade e o desempenho dos geradores podem ser severamente prejudicados (BUCHHOLZ; BOESE, 2003).

Os modos eletromecânicos são oscilações em baixa frequência que ocorrem nos rotores dos geradores síncronos, fazendo variar em torno da velocidade síncrona. Esses modos eletromecânicos podem ser estimulados por pequenas perturbações e observados como variações de ângulo de rotor de máquinas e oscilações no fluxo de potência ativa nas linhas. Em casos extremos podem ocasionar perdas do sincronismo dos geradores e, até mesmo, interrupção no suprimento de energia elétrica (KUNDUR, 1994; KUIAVA, 2007).

Na rede distribuída, os modos eletromecânicos possuem níveis de amortecimento e frequência maiores do que os observados em sistemas de transmissão. Isso ocorre devido ao fato de que as redes de distribuição são predominantemente constituídas por estrutura radiais, abrangendo distâncias elétricas curtas. Além do mais, os geradores em redes de distribuição possuem inercias menores quando comparados a redes de transmissão. O que acabam influenciando nos modos eletromecânicos (KUIAVA, 2007).

Os modos eletromecânicos podem ser classificados de três formas distintas (KUNDUR, 1994):

- **Modos Intraplanta:** acontecem entre máquinas de uma mesma usina. Possuem frequência entre 2,0 a 2,5 Hz.
- **Modos Locais:** acontecem com geradores proximamente conectados. Possuem frequência entre 0,7 a 2,0 Hz.
- **Modos Interárea:** acontecem com geradores de áreas distintas. Possuem frequência entre 0,1 a 0,7 Hz.

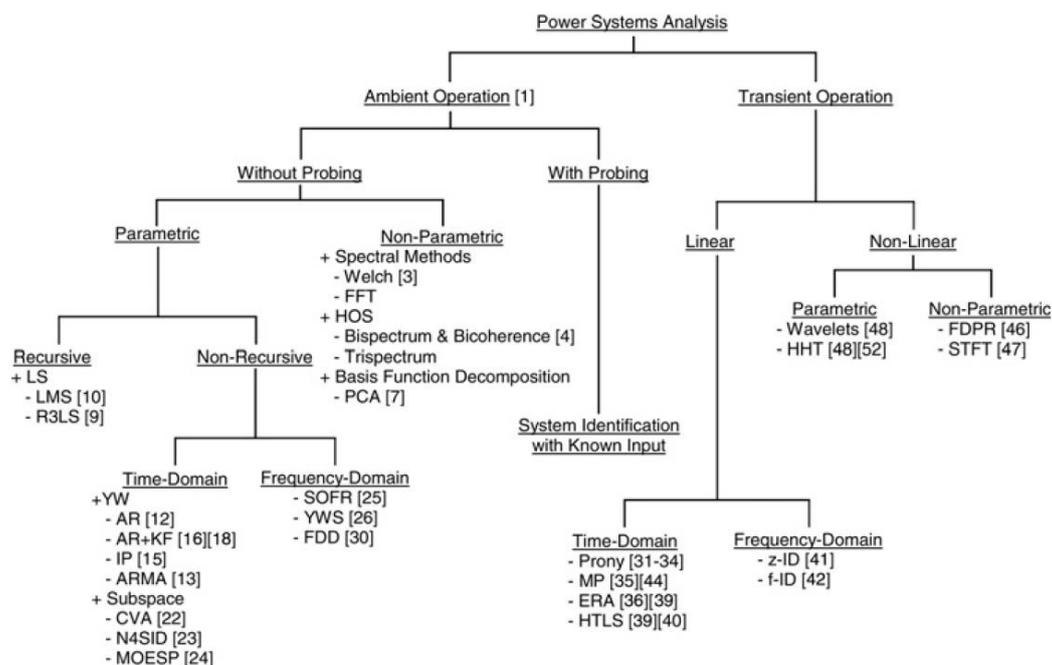
Para a identificação dos modos eletromecânicos serão utilizados métodos de decomposição modal. Este trabalho consiste em testar três diferentes algoritmos computacionais que realizam a decomposição modal e em seguida compará-los.

2.2 Métodos de decomposição modal.

Para a identificação de modos eletromecânicos é necessária uma ferramenta matemática que emprega o sinal de entrada, no caso é a velocidade angular do rotor do gerador síncrono e a saída são parâmetros de senoides amortecidas, ou seja, decaimento, frequência, ângulo de fase e amplitude de cada sinal. Esses valores variam de acordo com o desempenho do gerador e são influenciados pelas condições operativas do sistema (níveis de carregamento) e pelo estado topológico da rede (no que se refere aos estados operativos – ligado ou desligado - dos ramos, transformadores, etc...). Por isso a importância do estudo e a frequência de análise devem ser realizadas.

Há diferentes categorias de métodos de decomposição modal, como pode ser visto na FIGURA 2.2. O foco do trabalho está na categoria de métodos que processam sinais durante o regime transitório do sistema (*Transient Operation*), baseados em modelos lineares no domínio do tempo do sistema, onde se encontram os métodos de Prony e MP dentre outros, como é possível ver na FIGURA 2.2. Os métodos de decomposição modal são divididos em duas categorias distintas, a *ringdown analysis*, que correspondem aos métodos que operam em regime transitório do sistema (*Transient Operation*) e o *modemeter algorithm*, o qual corresponde ao regime normal de operação (*Ambient Operation*).

FIGURA 2.2 – categorias de métodos de decomposição modal



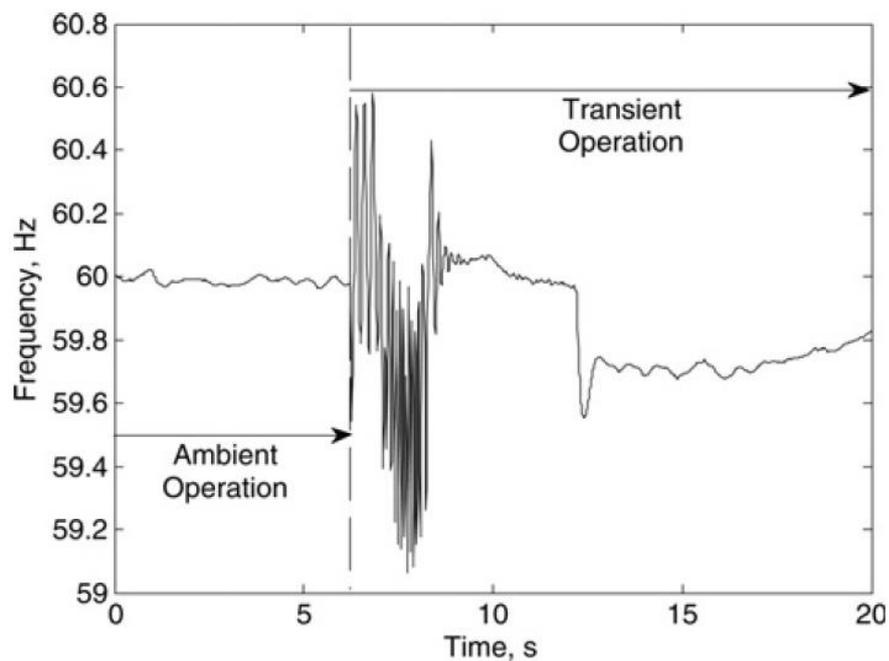
FONTE: (THAMBIRAJAH *et al*, 2009)

A FIGURA 2.3 ilustra um sinal de frequência coletado da rede onde estão evidenciados a operação ambiente e o período transitório. No exemplo da FIGURA 2.3, o momento que pode ser aplicado os métodos pertencentes a categoria *modemeter algorithms* é anterior à falha ocorrida, correspondente ao regime normal de operação (*Ambient Operation*), porém é maior a dificuldade de empregar esses métodos devido a sua complexidade matemática. Logo, são adotados os métodos da categoria *ringdown analysis* que são aplicados no

domínio do tempo, no regime transitório do sistema (*Transient Operation*), nos ciclos iniciais dos geradores após a falha.

Além dos algoritmos de Prony e MP indicados na FIGURA 2.2, um algoritmo que também será utilizado é o método ESPRIT. Os quais serão explicados neste capítulo.

FIGURA 2.3 – Operação ambiental e transitória no sistema de energia



FONTE: (THAMBIRAJAH *et al*, 2009)

2.2.1 ESPRIT

A técnica de estimação modal ESPRIT (*Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques*) consiste em uma técnica aprimorada de uma já existente chamada *Multiple Signal Classification* (MUSIC). Esse método aprimorado já era aplicado sobre sinais transitórios para identificação de harmônicos e inter-harmônicos, ou para verificar a qualidade de energia de um determinado SEP (FERNANDES, 2012; XAVIER 2014).

O algoritmo ESPRIT estima frequências através de um modelo para o sinal coletado na forma de um conjunto de senoides amortecidas, utilizando

também a ferramenta de subespaços dos sinais, desconsiderando o ruído branco do sinal (SALIM, 2011).

Na formulação do método ESPRIT deve ser retirado uma amostra de sinal $z(t_k)$ e que pode ser constituída por uma soma de senoides amortecidas:

$$z(t_k) = \sum_{i=0}^p A_i e^{-\alpha_i t_k} \cos(2\pi f_i t_k + \phi_i) + e(t_k) \quad (2.1)$$

- t_k – corresponde ao tempo associado ao passo k ;
- p – número de senoides que reconstituirão a amostra de sinal $z(t_k)$;
- i – índice referente a cada senoide do somatório;
- A_i - amplitude da senoide i ;
- α_i – índice de decaimento da senoide i ;
- f_i – frequência em *Hertz* da senoide i ;
- ϕ_i - fase associada à senoide i ;
- e – erro presente no sinal;

Para um número de p senoides pré-estabelecidas pelo usuário da técnica ESPRIT, os outros parâmetros são calculados pelos passos a seguir (BOLLEN *et. al*, 2005; XAVIER, 2014):

1. O sinal real transitório $z(t_k) = [z(t_1) \ z(t_2) \ z(t_3) \ \dots \ z(t_k) \ \dots]$, deve ser reamostrado em M partes ($M > p$) no qual essas partes serão vetores representados por $y(t_k) = [z(t_k) \ \dots \ z(t_{k+M-1})]^T$.
2. Com as M partes $y(t_k)$ são possíveis montar a matriz de covariância R correspondente à estimativa amostral, através da seguinte equação.

$$R = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M y(t_k) y^T(t_k) \quad (2.2)$$

3. A seguir, encontram-se os autovalores λ_i reais e seus autovetores s_i associados aos valores da matriz R. Após encontrá-los, os autovalores devem ser reorganizados de ordem decrescente, de tal maneira que os autovetores respeitem a distribuição dos autovalores. A partir dessa distribuição, é construído um vetor S, o qual é formado um subespaço do sinal.

$$S=(S_1.....S_p) \quad (2.3)$$

$$S_1=[I_{M-1} \ 0]S \quad (2.4)$$

$$S_2=[0 \ I_{M-1}]S \quad (2.5)$$

Onde I_{M-1} é uma matriz identidade de dimensão $(M - 1) \times (M - 1)$ e os zeros da equação representam uma coluna de zeros de dimensão $(M - 1) \times 1$.

4. Então, a partir das equações (2.4) e (2.5), é formada uma nova matriz $C=(S_1^T S_1)^{-1} S_1^T S_2$. Após esse procedimento, são encontrados os autovalores $(c_1 \dots c_p)$ as frequências f_i , os fatores de amortecimentos α_i de cada senoide a partir das equações (2.6) e (2.7) a seguir.

$$f_1 = \frac{\text{angulo}(c_1)}{\Delta t 2\pi} \quad (2.6)$$

$$\alpha_1 = -\frac{\ln(|c_i|)}{\Delta t} \quad (2.7)$$

Onde Δt o período de amostragem do sinal utilizado.

5. Para encontrar os demais parâmetros da expressão (2.1), o sistema com N amostras do sinal ($N > M$) deve ser resolvido:

$$X = VB \quad (2.8)$$

sendo,

$$V = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ c_1^1 & c_1^2 & c_3^1 & \dots & c_p^1 \\ c_1^2 & c_2^2 & c_3^2 & \dots & c_p^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_1^{N-1} & c_2^{N-1} & c_3^{N-1} & \dots & c_p^{N-1} \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

$$X = (z(t_0) \quad z(t_1) \quad \dots \quad z(t_{N-1}))^T \quad (2.10)$$

$$B = (b_1 \quad b_2 \quad \dots \quad b_p)^T \quad (2.11)$$

A equação (2.8) possui a solução a partir dos métodos dos mínimos quadrados, resultando na equação (2.12) (XAVIER, 2014).

$$B = (V^H V)^{-1} V^H X \quad (2.12)$$

Ao obter os elementos da matriz B é possível encontrar os valores da amplitude A_i e a fase ϕ_i de cada senoide com as equações 2.13 e 2.14

$$A_i = 2|b_i| \quad (2.13)$$

$$\phi_i = \text{angulo}(b_i) \quad (2.14)$$

Para a utilização do método ESPRIT, o usuário aplica o sinal amostrado, e o número de senoides. Assim, se encontra o amortecimento, a fase, a amplitude e por fim a frequência de cada senoide, facilitando para o usuário interpretar esses resultados.

2.2.2 Prony

O método de Prony é uma técnica de estimação modal pertencente à categoria *ringdown analysis* cuja diferença entre os demais métodos dessa categoria é decompor o sinal em exponenciais complexas, e com isso é possível identificar de maneira rápida a frequência, o amortecimento, fase e a amplitude de oscilações que são associadas aos modos eletromecânicos (MARPLE, 1987; FERNANDES, 2012).

Este método é uma técnica antiga introduzida originalmente em 1795 por Gaspard Riche, o Barão de Prony, o qual foi desenvolvido para identificação de leis que governam diferentes gases e são representados por somas de senoides amortecidas (MARPLE, 1987; FERNANDES, 2012). A primeira vez que essa técnica foi aplicada para identificação de modos eletromecânicos foi em (HAUER; DEMEURE; SCHARE, 1990).

Para a formulação do método é definida uma amostragem T e um sinal $x(n)$ representado por N amostras $x(1), \dots, x(N)$. O método de Prony estimará $x(n)$ a partir de uma soma de p exponenciais complexas (MARPLE, 1987; FERNANDES 2012) a partir da seguinte equação,

$$\hat{x}(n) = \sum_{k=1}^p A_k e^{[(\sigma_k + j2\pi f_k)(n-1)T + j\theta_k]} \quad (2.15)$$

Para $1 \leq n \leq N$, onde:

- k – corresponde a k -ésima exponencial complexa;
- p – número de exponenciais que reconstruirão a amostra de sinal $\hat{x}(n)$;
- A_k – referente à amplitude da exponencial complexa k ;
- f_k – frequência em *Hertz* da exponencial complexa k ;
- σ_k – índice de decaimento da exponencial complexa k ;
- θ_k – fase da exponencial complexa k .

Para desenvolver o método de Prony, a resposta da equação (2.15) é rescrita da seguinte forma:

$$\hat{x}(n) = \sum_{k=1}^p h_k z_k^{n-1} \quad (2.16)$$

sendo

$$h_k = A_k e^{j\theta_k} \quad (2.17)$$

$$z_k = e^{[(\sigma_k + j2\pi f_k)T]} \quad (2.18)$$

Para encontrar o vetor $\hat{x}(n)$ é necessário encontrar os valores h_k e z_k da equação (2.16). Para isso, é desenvolvido a equação (2.16) na forma matricial, a qual resulta em:

$$\begin{bmatrix} z_1^0 & z_2^0 & \dots & z_p^0 \\ z_1^1 & z_2^1 & \dots & z_p^1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ z_1^{p-1} & z_2^{p-1} & \dots & z_p^{p-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ \vdots \\ x(p) \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

A solução do método de Prony é a equação (2.16) que consiste na diferença linear homogênea de coeficientes constantes. Para encontrar essa equação é primeiramente definido um polinômio $\phi(z)$ o qual as suas raízes são as exponenciais z_k , definidas em (2.18). Esse polinômio é dado por (MARPLE, 1987; FERNANDES 2012):

$$\phi(z) = \prod_{k=1}^p (z - z_k) = \sum_{m=0}^p a(m)z^{p-m} \quad (2.20)$$

onde $a(m)$ são coeficientes complexos e $a(0)=1$.

Desenvolvendo a equação (2.20) tem-se (MARPLE, 1987; FERNANDES 2012):

$$\sum_{m=0}^p a(m)x(n-m) = \sum_{i=0}^p h_i z_i^{n-p} \sum_{m=0}^p a(m)z_i^{p-m-1} = 0 \quad (2.21)$$

É perceptível que o lado direito da equação (2.21) é igual ao polinômio definido por (2.20), onde a somatória é igual a zero. Logo para encontrar os valores de z_k é necessário encontrar os valores de $a(m)$, a partir da seguinte equação.

$$\begin{pmatrix} x^{(p)} & x^{(p-1)} & \dots & x^{(1)} \\ x^{(p+1)} & x^{(p)} & \dots & x^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x^{(2p-1)} & x^{(2p-2)} & \dots & x^{(p)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a^{(1)} \\ a^{(2)} \\ \vdots \\ a^{(p)} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} x^{(p+1)} \\ x^{(p+2)} \\ \vdots \\ x^{(2p)} \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

Com os valores dos coeficientes $a^{(m)}$, aplica-se em (2.20) e obtêm-se os valores das raízes z_1, \dots, z_p .

Através desses valores, é descoberta a taxa de decaimento e frequência através das seguintes expressões.

$$\sigma_k = \frac{\ln|z_k|}{T} \quad (2.23)$$

$$f_k = \frac{1}{2\pi T} \hat{\text{ângulo}} \left[\frac{\text{Im}\{z_k\}}{\text{Re}\{z_k\}} \right] \quad (2.24)$$

Após encontrar esses valores de (2.23) e (2.24), aplica-se os valores de z_1, \dots, z_p para a equação (2.19). A partir desse processo, encontram-se os índices h_k . Então, obtêm-se as amplitudes A_k e θ_k por intermédio das equações (2.23) e (2.24)

$$A_k = |h_k| \quad (2.23)$$

$$\theta_k = \hat{\text{ângulo}} \left[\frac{\text{Im}\{z_k\}}{\text{Re}\{z_k\}} \right] \quad (2.24)$$

2.2.3 MP

O último método a ser aplicado é o Método MP (*Matrix Pencil*) o qual pertence à categoria de *ringdown analysis*. Essa técnica é utilizada para

adquirir valores de frequência e amortecimento de exponenciais e senoides amortecidas em sinais com a presença de ruídos (DORIGHELLO; OLIVEIRA, 2018).

Dada a equação (2.25):

$$y(t) = x(t) + n(t) \approx \sum_1^M R_i e^{s_i t} + n(t) \quad (2.25)$$

Onde:

- $y(t)$: resposta no domínio do tempo;
- $n(t)$: ruído presente no sinal amostrado;
- $x(t)$: sinal amostrado;
- R_i : resíduo ou amplitude complexa da senoide i .
- $s_i = -\alpha_i + j\omega_i$
- α_i : fator de amortecimento da senoide i .
- ω_i : velocidade angular ($\omega_i = 2\pi f_i$) da senoide i .
- M : número de senoides do sinal.

Para efeitos matemáticos, o valor de t será substituído por $T_s k$, onde T_s é a amostra de tempo e k é um numero natural. Então:

$$y(T_s k) = x(T_s k) + n(T_s k) \approx \sum_1^M R_i e^{k} + n(T_s k) \quad (2.26)$$

Onde: $k = 0, \dots, N - 1$ e

$$z_i = e_s^{(\alpha_i + j\omega_i)T_s} \quad (2.27)$$

Para $i = 1, 2, \dots, M$.

O objetivo principal do método é estimar o melhor R_i e z_i . Portanto, uma vez que as N amostras são obtidas, uma matriz com tamanho $(N - L) \times (L + 1)$ é definida pela equação (2.28):

$$Y = \begin{bmatrix} y(0) & y(1) & \dots & y(L) \\ y(1) & y(2) & \dots & y(L+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(N-L-1) & y(N-L) & \dots & y(N-1) \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Onde L é o parâmetro da matriz e é escolhido entre $N/2$ e $N/3$.

A partir da matriz Y , duas matrizes com dimensões $(N - L) \times (L)$ são criadas e possuem o seguinte formato:

$$Y_1 = \begin{bmatrix} y(0) & y(1) & \dots & y(L-1) \\ y(1) & y(2) & \dots & y(L) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(N-L-1) & y(N-L) & \dots & y(N-2) \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$Y_2 = \begin{bmatrix} y(0) & y(2) & \dots & y(L) \\ y(1) & y(3) & \dots & y(L+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(N-L) & y(N-L+1) & \dots & y(N-2) \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

O valor de z_i da equação (2.27) é igual ao autovalor λ_i do par de matrizes Y_1 e Y_2 . Esses parâmetros podem ser obtidos através da solução representada na equação (2.31):

$$Y_1^+ Y_2 - \lambda I \quad (2.31)$$

Onde I é uma matriz identidade e λ é uma matriz diagonal o qual contem os autovalores do par de matrizes $Y_1^+ Y_2$ e Y_1^+ é definida através da equação (2.32):

$$Y_1^+ = \{Y_1^H Y_1\}^{-1} Y_1^H \quad (2.32)$$

A partir da equação (2.31) é necessário realizar uma decomposição a partir da matriz Y como pode ser visto na equação (2.33).

$$Y = U E V^H \quad (2.33)$$

Onde:

- U – Matriz de autovetores de Y^H ;
- V – Matriz de autovetores de $Y^H Y$;
- E – Matriz diagonal o qual contem valores singulares de Y ;
- $[.]^H$ – conjugado transposta da matriz.

A partir disso, uma nova matriz V é criada. Onde

$$V' = [V_1, V_2, \dots, V_M] \quad (2.34)$$

$$Y_1 = U E' [V_1']^H \quad (2.35)$$

$$Y_2 = U E' [V_2']^H \quad (2.36)$$

Então os valores de V_1' e V_2' podem ser reescritos como pode ser visto a seguir em (2.37)

$$\{[V_2']^H - \lambda[V_2']^H\} \rightarrow \{[V_2']^H + [V_1']^H\} - \lambda I \quad (2.37)$$

Os valores de λ_i são iguais aos valores de z_i e uma vez que os valores de M e z_i são conhecidos, é possível encontrar os valores dos resíduos R_i através da matriz (2.38).

$$\begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_{N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (z_1)^{N-1} & (z_2)^{N-1} & \dots & (z_M)^{N-1} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Os parâmetros de amortecimento (α_i), frequência (f_i), amplitude (A_i) e fase (ϕ_i) podem ser encontrados nas equações (2.39), (2.40), (2.41) e (2.42).

$$\alpha_i = \text{Re}(z_i) \quad (2.39)$$

$$f_i = \frac{1}{2\pi T} \hat{\text{angulo}} \left[\frac{\text{Im}\{z_i\}}{\text{Re}\{z_i\}} \right] \quad (2.40)$$

$$A_i = |R_i| \quad (2.41)$$

$$\phi_i = \hat{\text{angulo}}[R_i] \quad (2.42)$$

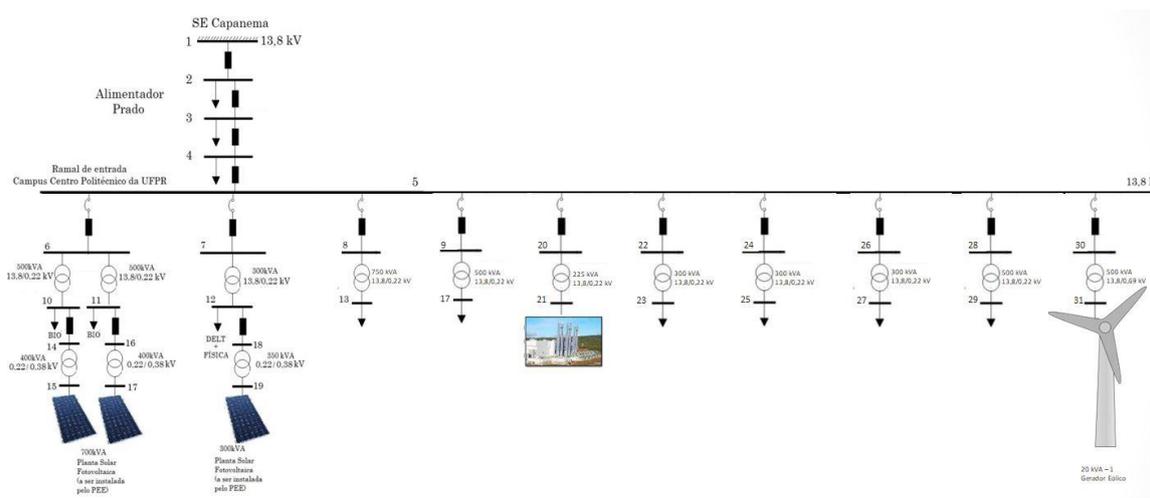
3. SISTEMA TESTE

Neste capítulo será apresentado o exemplo de rede de distribuição com geração distribuída que foi utilizado como sistema teste para a aplicação dos métodos de decomposição modal. As informações fundamentais como o tipo de gerador, dados de linhas e parâmetros dos geradores estão presentes neste capítulo.

3.1 Rede de distribuição com geração distribuída em estudo

Para que se possa realizar o estudo comparativo de diferentes métodos de decomposição modal, é necessário que se empregue um sistema teste. Este sistema está ilustrado na FIGURA 3.1, que é uma adaptação da rede do Centro Politécnico (CP) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), composta por 32 barras, 14 transformadores e 10 alimentadores. A rede é conectada por uma subestação com tensão de 13,8 kV, chamada de Subestação Capanema. As barras conectadas ao lado de alta dos transformadores utilizados possui a tensão de 13,8 kV, enquanto que as barras conectadas ao lado de baixa dos transformadores possuem a tensão de 0,22 kV, com exceção do barramento conectado ao gerador eólico, que possui a tensão de 0,69 kV e as barras conectadas às plantas de geração solar fotovoltaicas que possuem a tensão de 0,38 kV (KUIAVA; LEANDRO; OLIVEIRA, 2018). A rede original não possui o gerador eólico, que foi acrescentado para realização deste trabalho.

FIGURA 3.1 – Diagrama unifilar simplificado da rede elétrica do Campus CP da UFPR



FONTE: (KUIAVA; LEANDRO; OLIVEIRA, 2018 - Adaptado).

Os dados das cargas e barras do sistema são apresentados na TABELA 3.1 e os parâmetros de linhas e dos transformadores estão presentes na TABELA 3.2.

TABELA 3.1 – Dados das cargas da rede elétrica do Campus CP da UFPR

| Barra | Base (kV) | Tipo | Carga Reativa (MVar) | Carga Ativa (MW) |
|-------|-----------|------------|----------------------|------------------|
| 1 | 13,8 | θV | 0 | 0 |
| 2 | 13,8 | PQ | 0,3 | 0,8 |
| 3 | 13,8 | PQ | 0,25 | 0,7 |
| 4 | 13,8 | PQ | 0,15 | 0,5 |
| 5 | 13,8 | PQ | 0 | 0 |
| 6 | 13,8 | PQ | 0 | 0 |
| 7 | 13,8 | PQ | 0 | 0 |
| 8 | 13,8 | PQ | 0 | 0 |
| 9 | 13,8 | PQ | 0 | 0 |
| 10 | 0,22 | PQ | 0,2 | 0,5 |
| 11 | 0,22 | PQ | 0,2 | 0,5 |
| 12 | 0,22 | PQ | 0,13 | 0,35 |
| 13 | 0,22 | PQ | 0,2 | 0,6 |
| 14 | 0,22 | PQ | 0 | 0 |
| 15 | 0,38 | PV | 0 | 0,45 |
| 16 | 0,22 | PQ | 0 | 0 |
| 17 | 0,38 | PV | 0 | 0,45 |

Continua.

TABELA 3.1 – Dados das cargas da rede elétrica do Campus CP da UFPR

| Barra | Base (kV) | Tipo | Carga Reativa (MVar) | Carga Ativa (MW) |
|-------|-----------|------|----------------------|------------------|
| 18 | 0,22 | PQ | 0 | 0 |
| 19 | 0,38 | PV | 0 | 0,3 |
| 20 | 0,38 | PQ | 0,1 | 0,4 |
| 21 | 13,8 | PQ | 0 | 0 |
| 22 | 0,22 | PV | 0 | 0,05 |
| 23 | 13,8 | PQ | 0 | 0 |
| 24 | 0,22 | PQ | 0,08 | 0,25 |
| 25 | 13,8 | PQ | 0 | 0 |
| 26 | 0,22 | PQ | 0,08 | 0,25 |
| 27 | 13,8 | PQ | 0 | 0 |
| 28 | 0,22 | PQ | 0,08 | 0,25 |
| 29 | 13,8 | PQ | 0 | 0 |
| 30 | 0,22 | PQ | 0,1 | 0,4 |
| 31 | 13,8 | PQ | 0 | 0 |
| 32 | 0,69 | PV | 0 | 0,02 |

FONTE: (KUIAVA; LEANDRO; OLIVEIRA, 2018 - Adaptado).

TABELA 3.2 – Dados de linhas e transformadores da rede elétrica do Campus CP da UFPR

| De | Para | Resistência (Ω) | Impedância (Ω) |
|----|------|--------------------------|-------------------------|
| 1 | 2 | 0,015 | 0,052 |
| 2 | 3 | 0,359 | 0,693 |
| 3 | 4 | 0,015 | 0,020 |
| 4 | 5 | 0,060 | 0,028 |
| 5 | 6 | 0,535 | 0,248 |
| 5 | 7 | 0,200 | 0,093 |
| 5 | 8 | 0,094 | 0,043 |
| 5 | 9 | 0,434 | 0,201 |
| 5 | 21 | 0,140 | 0,065 |
| 5 | 23 | 0,127 | 0,059 |
| 5 | 25 | 0,267 | 0,123 |
| 5 | 27 | 0,267 | 0,123 |
| 5 | 29 | 0,234 | 0,108 |
| 5 | 31 | 0,368 | 0,170 |
| 6 | 10 | 0,001 | 0,058 |
| 6 | 11 | 0,001 | 0,058 |

continua

TABELA 3.2 – Dados de linhas e transformadores da rede elétrica do Campus CP da UFPR

| De | Para | Resistência (Ω) | Impedância (Ω) |
|----|------|--------------------------|-------------------------|
| 7 | 12 | 0,001 | 0,048 |
| 8 | 13 | 0,001 | 0,043 |
| 9 | 20 | 0,001 | 0,058 |
| 21 | 22 | 0,140 | 0,065 |
| 23 | 24 | 0,001 | 0,046 |
| 25 | 26 | 0,001 | 0,069 |
| 27 | 28 | 0,001 | 0,069 |
| 29 | 30 | 0,001 | 0,045 |
| 31 | 32 | 0,001 | 0,048 |
| 10 | 14 | 0,001 | 0,058 |
| 11 | 16 | 0,001 | 0,058 |
| 12 | 18 | 0,001 | 0,048 |
| 14 | 15 | 0,535 | 0,248 |
| 16 | 17 | 0,535 | 0,248 |
| 18 | 19 | 0,200 | 0,093 |

FONTE: (KUIAVA; LEANDRO; OLIVEIRA, 2018 - Adaptado).

3.2 Gerador Síncrono

Para que seja possível a identificação de modos eletromecânicos, escolheu-se um gerador a diesel localizado no barramento de número 22, observado na FIGURA 3.1. Este tipo de gerador é tipicamente encontrado em sistemas de geração distribuída. As características deste gerador são as seguintes:

- Potência ativa: 50 kW
- Tensão nominal: 220 V
- Frequência nominal: 60 Hz

Além desses fatores, a potência reativa do gerador foi considerada nula para que não haja interferência sobre a simulação, tendo em vista que o fator de potência em geradores síncronos no contexto da geração distribuída é unitário (XAVIER, 2014).

4. TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo, serão discutidos procedimento de aplicação dos métodos de decomposição modal e os resultados das aplicações das técnicas de estimação modal na velocidade do rotor do gerador a diesel no sistema teste. Além disso, serão comparados os desempenhos de cada técnica e suas características.

4.1 Cenários

Para realizar o estudo comparativo de diferentes métodos de decomposição modal, foi desenvolvida uma simulação a partir do sistema teste. A ferramenta utilizada para a simulação foi o software MATLAB, desenvolvido pela MathWorks Inc. Foram empregados três diferentes cenários, que podem ser vistos na TABELA 4.1. Os cenários são: O sistema original, o sistema sem as plantas fotovoltaicas, que possuem uma potência de 1,0 GW e o gerador eólico de potência de 20 kVA e por fim, com três geradores eólicos de 20 kVA e as plantas fotovoltaicas.

TABELA 4.1 – Diferentes cenários introduzidos no sistema

| Cenários | Geradores Fotovoltaicos | Gerador a Diesel | Geradores Eólicos | Potência Gerada |
|----------|-------------------------|------------------|-------------------|-----------------|
| 1 | 0 | 1 | 0 | 50 kW |
| 2 | 2 | 1 | 1 | 1070 kW |
| 3 | 2 | 1 | 3 | 1110 kW |

FONTE: (O Autor, 2018).

O que difere os cenários são os valores de potência na rede do sistema teste. No cenário 1, é a menor quantidade de potência possível, enquanto no cenário 3 é a maior potência que pode ser instalada na rede. Além dessas disposições, será acrescentado um ruído no sinal de velocidade angular do gerador síncrono, este ruído será importante para o estudo o qual se verificar a robustez de cada método de decomposição modal.

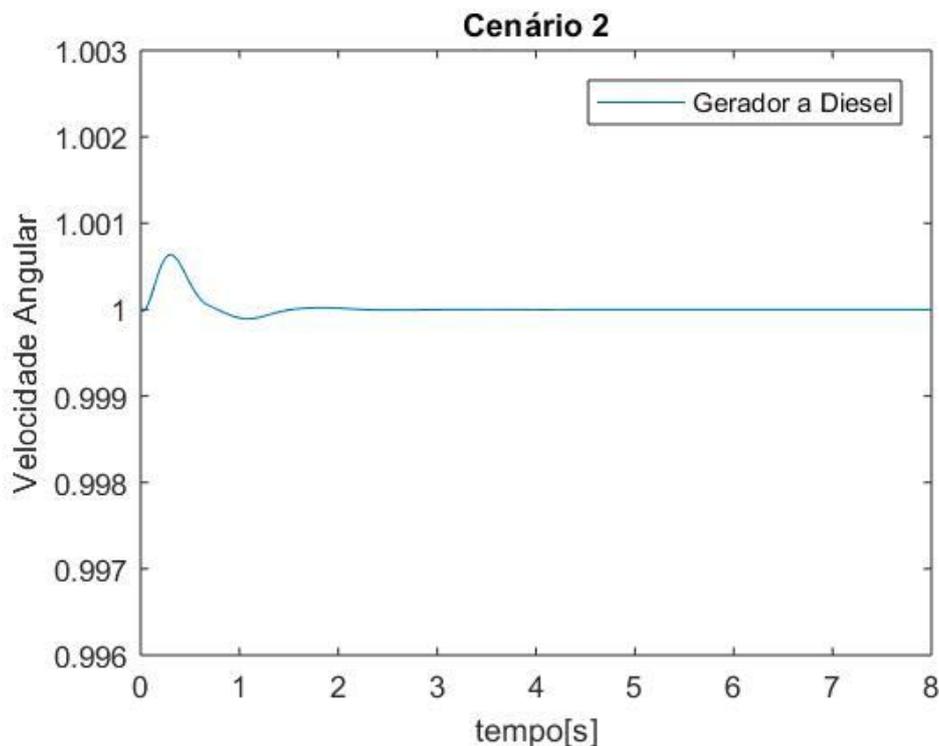
A potência dos cenários e a presença de ruídos serão importantes parâmetros para critério comparativo das técnicas de decomposição modal do sistema.

4.2 Procedimento para aplicação dos métodos de decomposição modal.

O procedimento empregado para aplicação dos métodos de decomposição modal é dado por:

1. É Executada uma simulação do sistema teste e adquire a velocidade do rotor do gerador a diesel em função do tempo para que seja feita a análise. Como é visto na FIGURA 4.1, o qual ser refere ao cenário 2 do sistema teste.

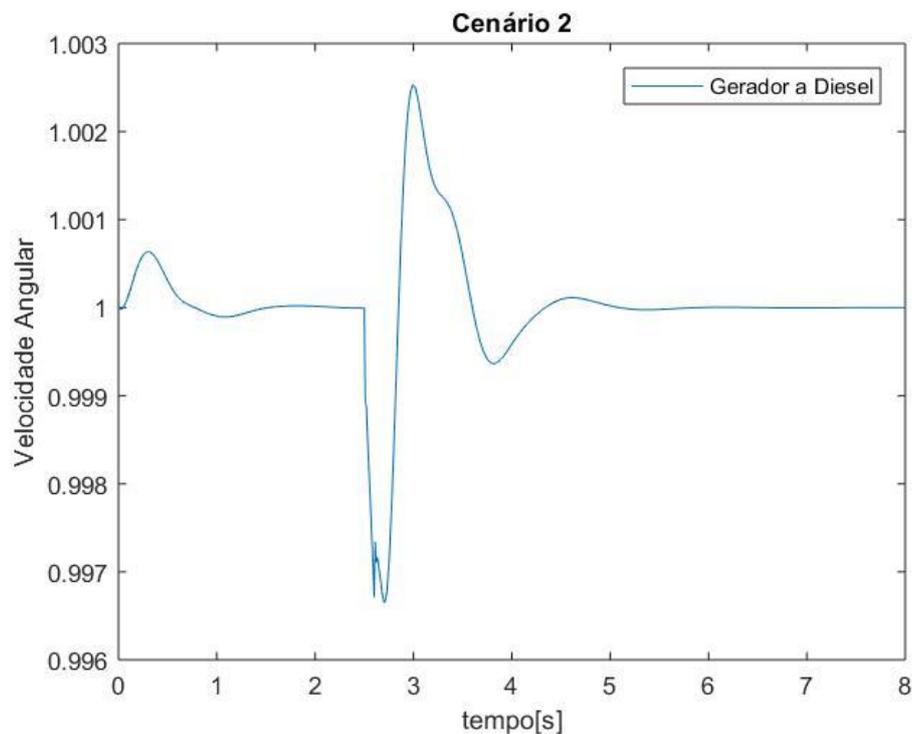
FIGURA 4.1 – Velocidade angular do rotor do gerador no cenário 2



FONTE: (O Autor, 2018).

- Então é aplicado um distúrbio na rede em formato de curto circuito no momento em que o sistema se estabiliza. No cenário 2, é aplicado o distúrbio de duração de 0,1 segundos no instante de 2,5 segundos e novamente é retirado a velocidade do rotor do gerador a diesel. O resultado pode ser visto na FIGURA 4.2.

FIGURA 4.2 – Velocidade angular do rotor do gerador no cenário 2 com distúrbio



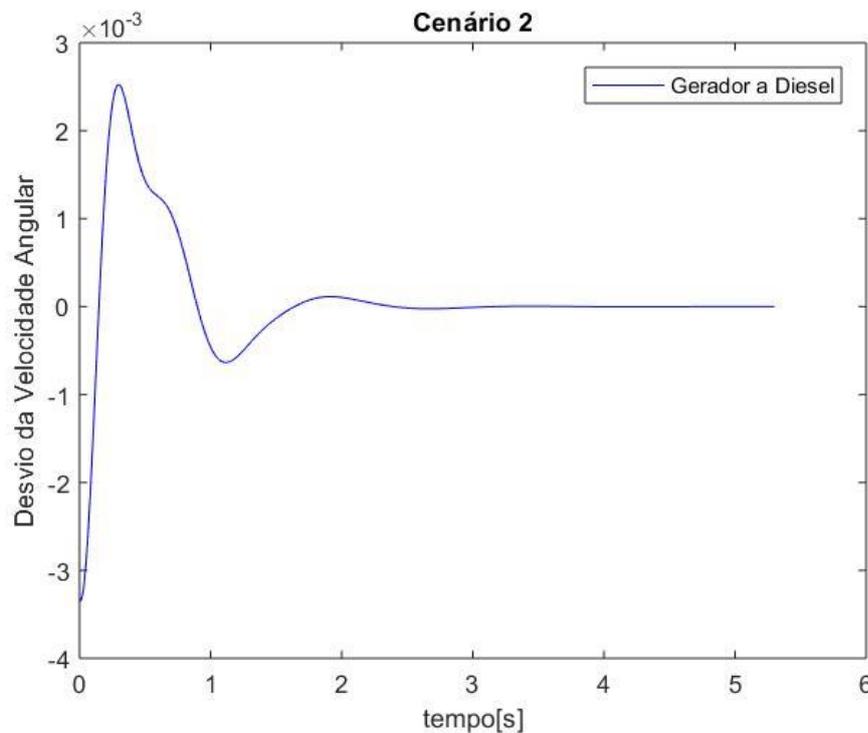
FONTE: (O Autor, 2018).

- Por fim, para que sejam aplicadas as técnicas de decomposição modal, são descartados os valores anteriores ao momento do curto circuito e os valores são normalizados em torno de zero, como é visto na FIGURA 4.3.

Esses procedimentos foram repetidos nos demais cenários, incluindo com e sem ruído na velocidade angular do rotor do gerador. Após obter os valores de velocidade angular, foram aplicados os métodos de decomposição

modal. Os resultados de cada método podem ser vistos nas seções 4.3, 4.4 e 4.5.

FIGURA 4.3 – Velocidade angular do rotor do gerador no cenário 2 após distúrbio



FONTE: (O Autor, 2018).

Para a realização do estudo comparativo, foram utilizados três diferentes critérios: o menor erro em relação com a curva de velocidade com a curva estimada de cada técnica, o menor número de componentes utilizadas para cada método e, por fim, a robustez a ruídos de cada técnica, que será aplicado à mesma análise de erro, com a presença de ruídos no gerador testado.

4.3 Erro

O primeiro critério a ser analisado é o erro da curva estimada em relação à curva original do sistema. Para calcular o erro, foi empregada a equação (4.1), a qual é dada pelo módulo da diferença entre a curva estimada e a curva

original de velocidade angular do rotor do gerador síncrono durante o tempo que foi aplicado a simulação.

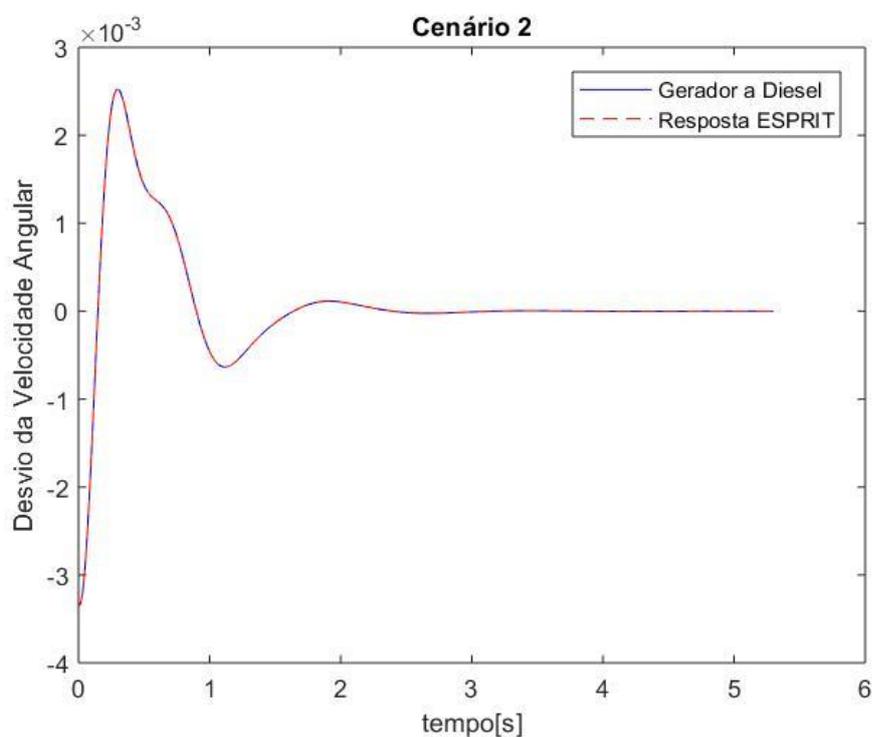
$$erro = \sum_{t=0}^{t_f} |estimado(t) - sinal(t)| \quad (4.1)$$

- t_f – tempo final;
- $estimado(t)$ – referente a curva estimada pelo método de estimação modal;
- $sinal(t)$ – corresponde ao sinal medido e que foi aplicado o método de estimação modal;
- erro – refere-se à somatória da diferença do sinal estimado e o sinal utilizado para aplicação do método.

A primeira técnica a ser testada foi o ESPRIT. A curva da velocidade do rotor e a curva estimada podem ser observadas na figura 4.4, tendo o exemplo retirado para o cenário 2. Esse mesmo procedimento foi aplicado tanto para o cenário 1, quanto para o cenário 3.

Ao aplicar a equação (4.1) no cenário 1, no cenário 2 e no cenário 3, foi obtido as respostas de: 0,0469, 0,0515 e 0,0563 respectivamente. Nota-se que na figura 4.4 e os valores de erro, o algoritmo ESPRIT consegue estimar o sinal com uma margem de erro baixa sem que haja uma maior influência na potência dos geradores na rede.

FIGURA 4.4 – Estimação Modal ESPRIT do cenário 2

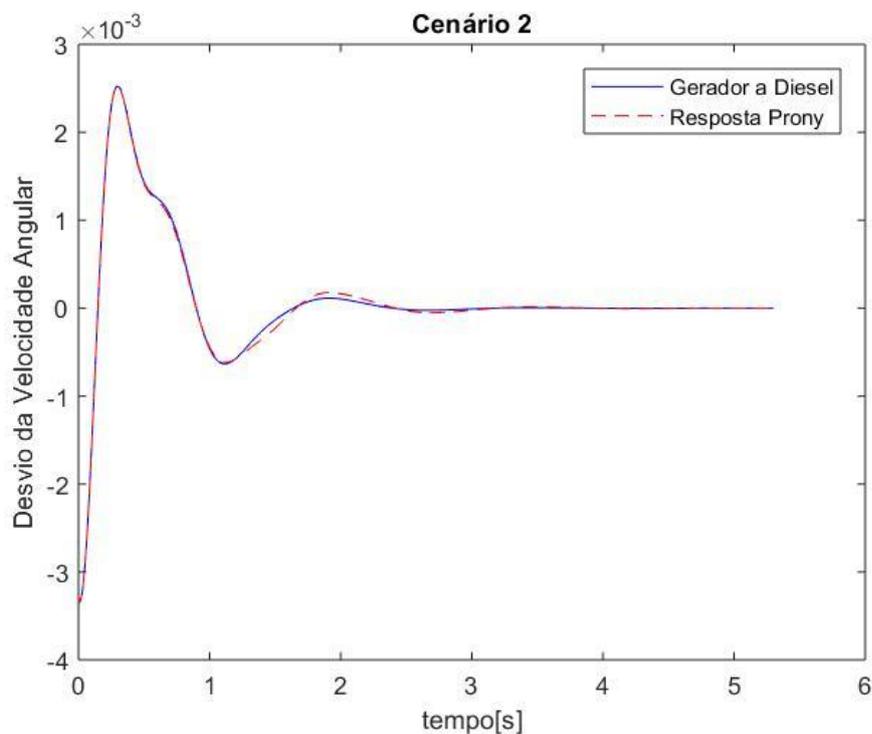


FONTE: (O Autor, 2018).

Após aplicar o ESPRIT, foi aplicado o método de Prony nos cenários, para estimação modal. Os resultados podem ser vistos na FIGURA, 4.5.

Ao aplicar o método de Prony é perceptível através do gráfico que há uma diferença maior entre as curvas de velocidade do rotor do gerador e a curva estimada, porém ao se analisar os erros dos cenários, os quais respectivamente são 0,0098, 0,0121 e 0,0123, o método de Prony é mais preciso que o método de ESPRIT.

FIGURA 4.5 – Estimação Modal Prony do cenário 2

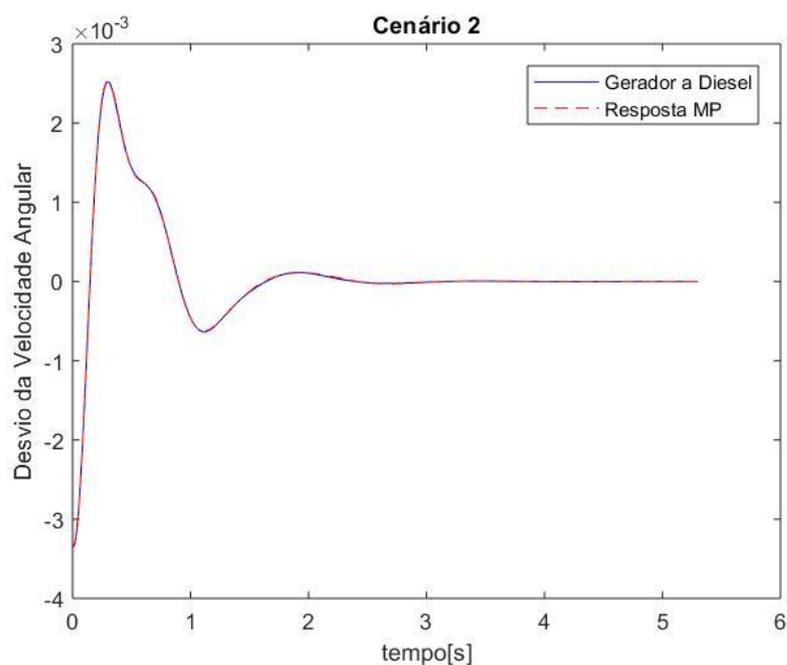


FONTE: (O Autor, 2018).

Por fim, foi aplicado o método de MP nos três cenários utilizados. Na FIGURA 4.6 é possível observar como a técnica estima o sinal no cenário 2.

Tendo em vista a FIGURA 4.6, a curva estimada pela resposta do método MP é mais precisa que as curvas estimadas pelos métodos de Prony e o método de ESPRIT. Os erros de cada cenário, os quais são respectivamente: 0,0021 0,0023 e 0,0024, apenas confirmam que o método MP é mais preciso na situação sem ruído no gerador a diesel. A comparação entre os três métodos pode ser visto na TABELA 4.2.

FIGURA 4.6 – Estimação Modal MP do cenário 2



FONTE: (O Autor, 2018).

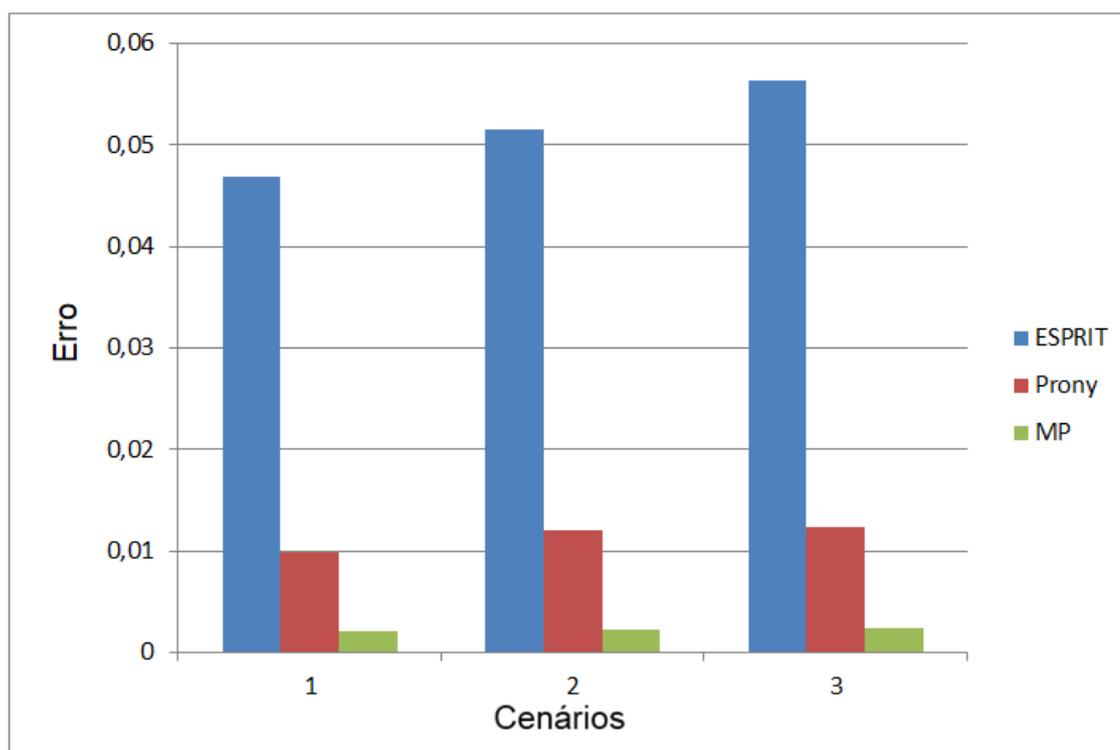
TABELA 4.2 – Relação dos métodos e os erros sem ruído no rotor do gerador

| Cenários | 1 | 2 | 3 |
|----------|--------|--------|--------|
| ESPRIT | 0,0469 | 0,0515 | 0,0563 |
| Prony | 0,0098 | 0,0121 | 0,0123 |
| MP | 0,0021 | 0,0023 | 0,0024 |

FONTE: (O Autor, 2018)

No TABELA 4.2 é possível ser analisado o quanto são precisos os métodos. A diferença de erro entre o cenário de menor e o cenário de maior potência é de 0,01 em relação à curva original de velocidade angular do gerador, também pode ser visto nesta mesma TABELA é o método MP ter o menor erro em relação aos demais métodos, sendo o erro menor que 1% da diferença entre a curva original e a curva estimada, esses valores podem ser melhores visualizados na FIGURA 4.7.

FIGURA 4.7 – Gráfico em barras de erros sem ruído no rotor do gerador.



FONTE: (O Autor, 2018).

4.4 Número de componentes

O segundo critério o qual foi utilizado para o estudo comparativo é o número de componentes de cada método. A importância desse parâmetro é o quanto de recurso computacional é necessário para a realização da técnica.

Foram aplicadas as técnicas ESPRIT, Prony e MP nos cenários empregados no sistema teste. Como as características das curvas da velocidade do rotor do gerador a diesel não variam em relação aos cenários, foi utilizado como exemplo apenas o cenário 2. Os resultados das técnicas ESPRIT, Prony e MP são vistas nas TABELAS 4.3, 4.4 e 4.5 respectivamente.

TABELA 4.3 – Componentes do método ESPRIT para o cenário 2.

| ESPRIT | Amplitude | Amortecimento | Frequência | Fase |
|--------|-----------|---------------|------------|----------|
| 1 | 0,005 | 1,8934 | 0,6487 | -112,353 |
| 2 | 0,0044 | 4,5687 | 1,9446 | 136,6291 |
| 3 | 0,0018 | 2,7017 | 1,3109 | 3,917 |

FONTE: (O Autor, 2018).

TABELA 4.4 – Componentes do método Prony para o cenário 2.

| Prony | Amplitude | Amortecimento | Frequência | Fase |
|-------|-----------|---------------|------------|----------|
| 1 | 0,002 | -1,5862 | 0,6548 | -118,697 |
| 2 | 0,002 | -1,5862 | -0,6548 | 118,6974 |
| 3 | 0,0000001 | -2,0875 | 39,9745 | 118,3995 |
| 4 | 0,0000001 | -2,0875 | -39,9745 | -118,399 |
| 5 | 0,0007 | -2,682 | 1,9121 | 166,7356 |
| 6 | 0,0007 | -2,682 | -1,9121 | -166,736 |
| 7 | 0,0000001 | -4,3719 | 38,9207 | -120,777 |
| 8 | 0,0000001 | -4,3719 | -39,9207 | 120,7773 |
| 9 | 0,0005 | -5,4302 | 2,5846 | 91,89941 |
| 10 | 0,0005 | -5,4302 | -2,5846 | -91,9994 |
| 11 | 0,0000001 | -10,5636 | 40,9825 | 61,15932 |
| 12 | 0,0000001 | -10,5636 | -40,9825 | -61,1593 |
| 13 | 0,0000001 | -26,4141 | 11,7826 | -54,6045 |
| 14 | 0,0000001 | -26,4141 | -11,7826 | 54,60449 |
| 15 | 0,0000001 | -35,0165 | 32,1816 | 107,513 |
| 16 | 0,0000001 | -35,0165 | -32,1816 | -107,513 |
| 17 | 0,0000001 | -36,9344 | 28,144 | -1,28919 |
| 18 | 0,0000001 | -36,9344 | -28,144 | 1,289193 |
| 19 | 0,0001 | -69,9799 | 0 | 0 |
| 20 | 0,0000001 | -176,538 | 50 | 0 |

FONTE: (O Autor, 2018).

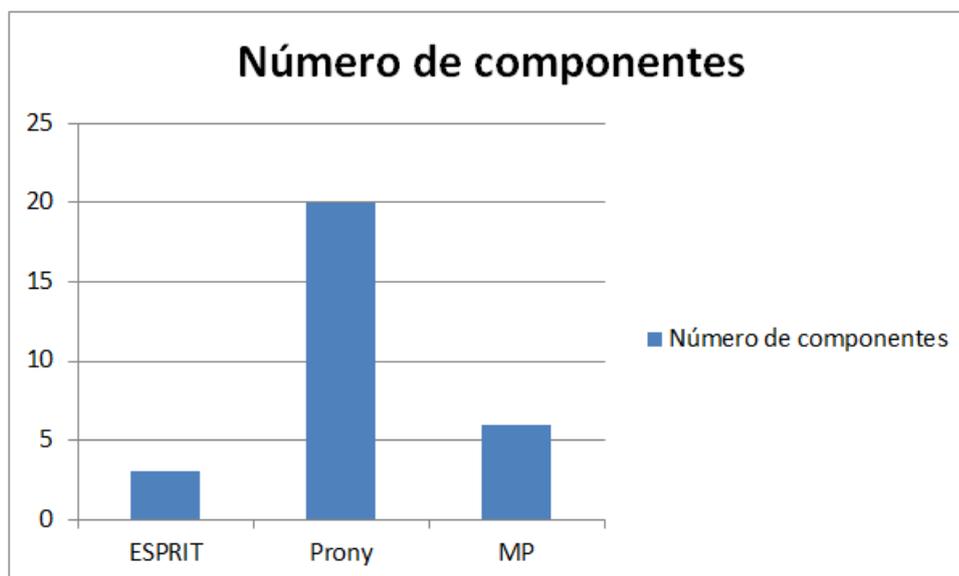
TABELA 4.5 – Componentes do método MP para o cenário 2.

| MP | Amplitude | Amortecimento | Frequência | Fase |
|----|-----------|---------------|------------|---------|
| 1 | 0,0021 | -4,5581 | -1,9537 | -136,01 |
| 2 | 0,0021 | -4,5581 | 1,9537 | 136,01 |
| 3 | 0,0025 | -1,8897 | -0,6483 | 112,32 |
| 4 | 0,0025 | -1,8897 | 0,6483 | -112,32 |
| 5 | 0,0008 | -2,6155 | -1,3094 | -3,965 |
| 6 | 0,0008 | -2,6155 | 1,3094 | 3,965 |

FONTE: (O Autor, 2018).

Nota-se que o número de componentes varia de acordo com cada método. No caso do método ESPRIT é possível utilizar um menor número de componentes para adquirir um sinal estimado com menor erro. Enquanto o método de Prony é necessário um número maior de componentes para adquirir o menor erro, assim utilizando uma maior quantidade de recursos computacionais. Na FIGURA 4.8 pode ser visualizada a comparação do número de componentes por método.

FIGURA 4.8 – Gráfico de barras do número de componentes por método.



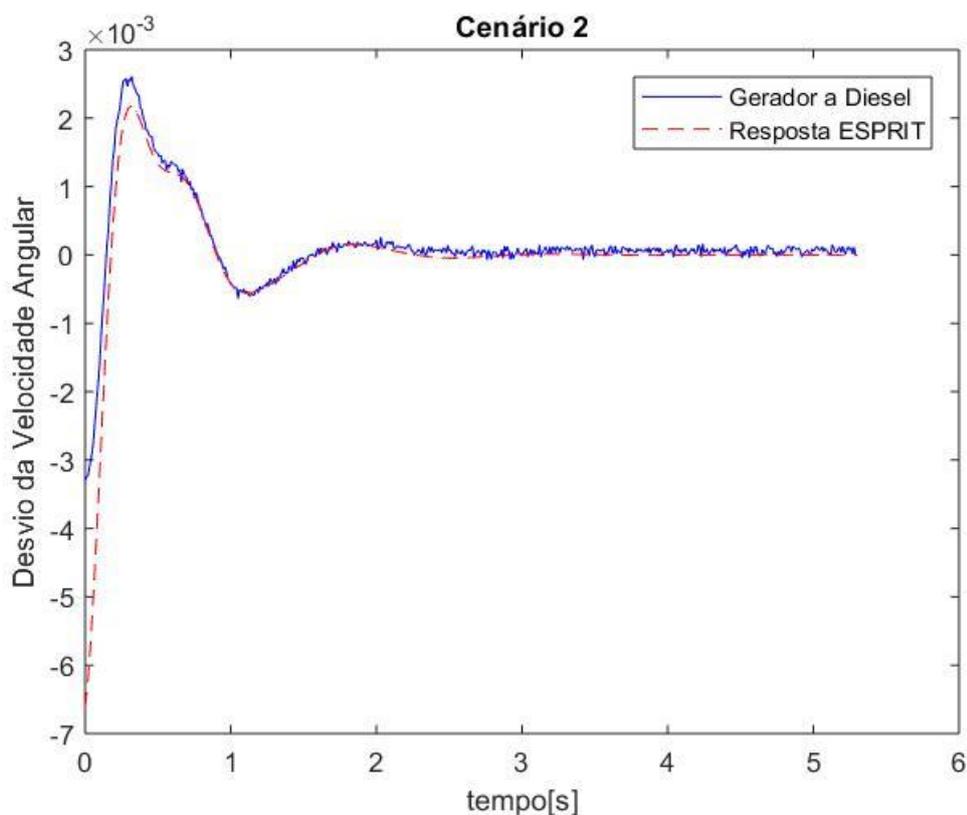
FONTE: (O Autor, 2018).

4.5 Robustez a ruídos

O último parâmetro a ser utilizado como critério é a robustez a ruídos, ou seja, o quanto a técnica de estimação modal é precisa considerando a presença de ruídos na velocidade do rotor do gerador síncrono, o qual se compara ao sinal real da velocidade do gerador. Então foi aplicada a mesma equação (4.1) da seção 4.3.

A FIGURA 4.9 mostra o resultado do cenário 2 com ruído de potência de 10^{-13} na velocidade angular do rotor do gerador a diesel. Esse procedimento foi repetido também nos cenários 1 e 3.

FIGURA 4.9 – Estimação Modal ESPRIT do cenário 2 com ruído

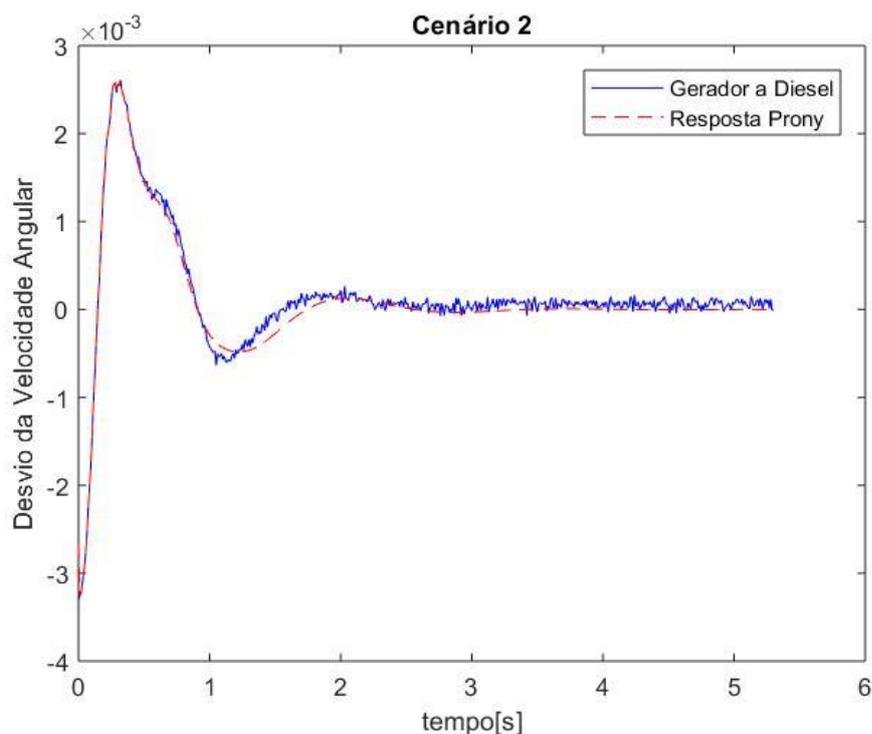


FONTE: (O Autor, 2018).

O ruído acaba influenciando na técnica ESPRIT dos três cenários distintos, porém considerando os erros dos cenários, os quais são 0,0718, 0,0736 e 0,0767 respectivamente.

Então, foi realizado o mesmo procedimento para a técnica Prony, como pode ser visto na FIGURA 4.10 para o cenário 2, esse mesmo processo foi repetido tanto para o cenário 1 quanto para o cenário 3.

FIGURA 4.10 – Estimação Modal Prony do cenário 2 com ruído

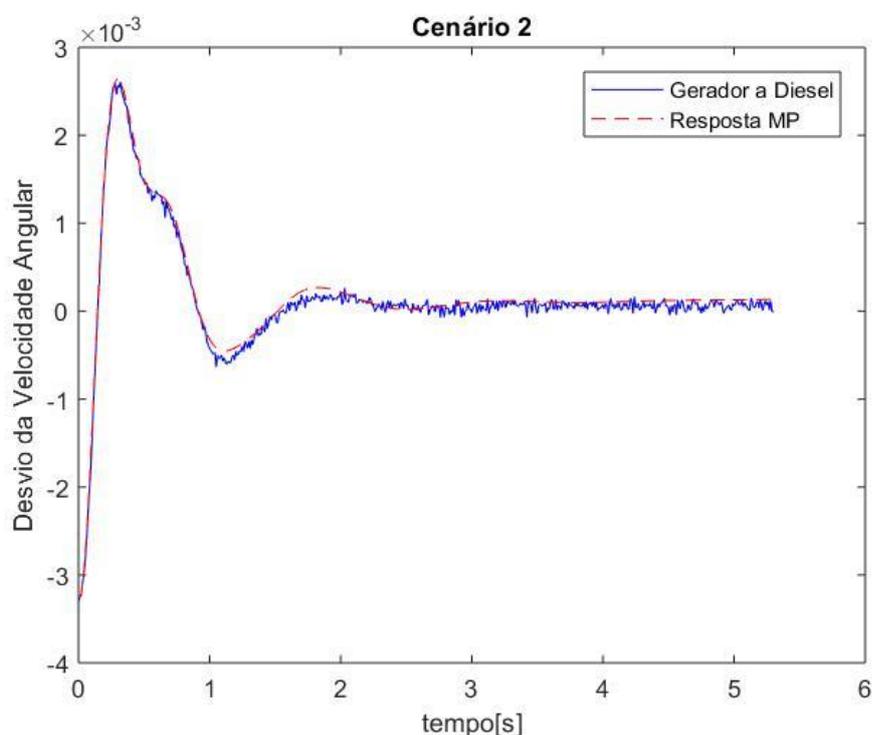


FONTE: (O Autor, 2018).

Na FIGURA 4.10 é possível verificar que há uma dificuldade da estimativa Prony em seguir a curva de velocidade do rotor gerador a diesel em exatidão, porém ao analisar os erros, os quais são 0,0374, 0,0377 e 0,0380 respectivamente para os cenários 1, 2 e 3, o erro permanece praticamente invariável de acordo com a potência instalada no sistema, além disso, a diferença entre o erro sem ruído e o erro com ruído aumenta em três vezes.

Por fim, foi aplicado nos três cenários o método MP, na FIGURA 4.11 é possível verificar o resultado do método para o cenário 2.

FIGURA 4.11 – Estimação Modal MP do cenário 2 com ruído



FONTE: (O Autor, 2018).

Como pode ser visto na FIGURA 4.9, o método MP é o que mais se aproxima da curva real do gerador a diesel, é possível também perceber isso através dos erros dos cenários, os quais são respectivamente: 0,0322, 0,0322 e 0,0323. A comparação entre as três diferentes técnicas pode ser vista através da TABELA 4.6.

TABELA 4.6 – Relação dos métodos e os erros com ruído no rotor do gerador

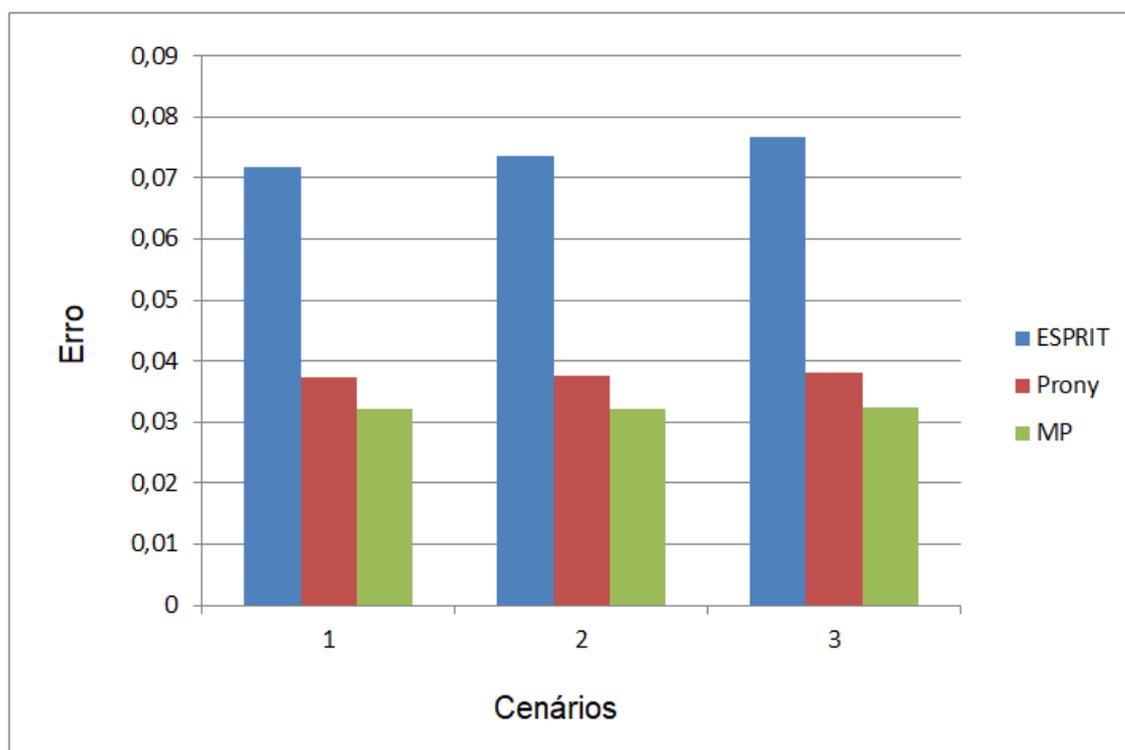
| Cenários | 1 | 2 | 3 |
|----------|--------|--------|--------|
| ESPRIT | 0,0718 | 0,0736 | 0,0767 |
| Prony | 0,0374 | 0,0377 | 0,0380 |
| MP | 0,0322 | 0,0322 | 0,0323 |

FONTE: (O Autor, 2018).

Ao analisar a TABELA 4.6, é possível verificar que o método que possui o menor erro em relação ao ruído é a técnica MP, sendo menor que a metade

do erro obtido pela técnica ESPRIT. Além disso, a potência na rede teve influência quase nula na técnica MP, a qual teve o crescimento de apenas 0,001 de erro, enquanto na técnica ESPRIT teve o aumento de 0,0049 e a técnica Prony o crescimento de 0,006, o que pode também ser visto na FIGURA 4.12.

FIGURA 4.12 – Gráfico em barras de erros com ruído no rotor do gerador.



FONTE: (O Autor, 2018).

Em linhas gerais, a técnica de estimação modal MP teve um melhor desempenho no quesito de maior precisão, ou seja, menor erro, com ou sem a presença de ruídos no rotor do gerador a diesel. Ao considerar a menor quantidade de componentes do sinal, a resposta mais satisfatória foi a técnica ESPRIT, obtendo o menor erro possível com apenas três componentes possíveis. Apesar da técnica de estimação modal Prony não obter os melhores resultados, é satisfatório o resultado devido ao valor de erro ser próximo a técnica MP, que teve o menor erro possível.

5. CONCLUSÃO

Com a crescente necessidade de descentralizar a geração de energia elétrica e a redução das usinas elétricas que causam um alto impacto socioambiental, nas últimas décadas, o crescimento da utilização de fontes de energia renováveis que promovem a geração distribuída traz a necessidade de um estudo mais avançado sobre as GDs. Entre esses estudos, o que vem mais ganhando importância é o estudo sobre a estabilidade de sistemas de geração distribuída.

Um dos elementos que influenciam diretamente na estabilidade de sistemas de geração distribuída são as pequenas perturbações, que levam o surgimento de modos eletromecânicos, que se não amortecidos, podem ocasionar desde desgastes no rotor a perda de sincronismo de geradores síncronos. Então, é necessária a utilização de algoritmos que sejam capazes de identificar os modos oscilatórios de maneira mais rápida e eficiente possível.

No trabalho apresentado, criou-se uma simulação a partir de um sistema elétrico de potência real e então foram aplicados três diferentes métodos de decomposição modal pertencentes a uma mesma categoria, o método ESPRIT, o método de Prony e por fim o método de MP, no rotor de um dos geradores síncronos pertencentes à rede.

Após a aplicação dos três métodos de decomposição modal, foi realizado um estudo comparativo a partir dos resultados obtidos. Os parâmetros de análise foram: menor erro possível, o número de componentes possíveis para a melhor aproximação e a robustez em relação a ruídos no sistema.

Em relação ao menor erro possível, o sistema teste foi simulado sem a presença de ruídos, apesar de não ser um cenário mais real possível, é capaz de ter uma noção de qual método é mais preciso, O método de ESPRIT foi a técnica que teve maior erro, enquanto as técnicas de Prony e MP foram a de valores mais baixo. Ao considerar o número de componentes para obter a curva mais próxima ao sinal original, o método ESPRIT necessitou de menos componentes, já o método de Prony, foi necessário um numero superior de

componentes para alcançar um valor desejado, assim necessitando de um recurso computacional maior, o método de MP ficou mais próximo ao método de ESPRIT. No quesito de ruídos, utilizou-se a mesma metodologia aplicada no cenário sem a presença de ruídos no sinal, sendo os métodos de MP e de Prony os mais similares, enquanto o valor de erro no método ESPRIT foi superior aos outros métodos.

Em linhas gerais, as três técnicas de decomposição modal possuem uma grande eficiência, sendo capaz de construir o sinal original de maneira satisfatória, porém o melhor dos métodos vistos é a técnica MP, que apesar de necessitar de um número maior de componentes que o método ESPRIT, é a técnica que traz o resultado com o menor erro possível e o menos influenciado com a potência do sistema apresentado neste trabalho.

REFERÊNCIAS

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica**. 2015. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 22 nov. 2018.

ANEEL (Org.). **Geração distribuída ultrapassa 20 mil conexões**. 2018. Coordenada pela Assessoria de Imprensa. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/geracao-distribuida-ultrapassa-20-mil-conexoes/656877>. Acesso em: 20 nov. 2018.

XAVIER, Paulo Henrique. **Aplicação de Técnicas de Estimção Modal para Análise de Estabilidade de modos eletromecânicos de baixa frequência no contexto da geração distribuída**. 2014. 112 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

RIBEIRO, Vagner Romero da Rocha; CRUZ, Antônia Ferreira dos Santos. **ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA IMPLANTAÇÃO DE GRUPO GERADOR**. In: XVI SEPA - SEMINÁRIO ESTUDANTIL DE PRODUÇÃO ACADÊMICA, 16., 2017, Salvador. Revistas Unifacs. Salvador: Unifacs, 2017. p. 1 - 21.

RAMOS, Bárbara Mendes. **Algoritmo para identificação de modos eletromecânicos de baixa frequência no contexto da geração distribuída**. 2016. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

FERNANDES, Tatiane Cristina da Costa. **Aplicação de Técnicas de Estimção Modal para Análise da Estabilidade a Pequenas Perturbações de Sistemas de Distribuição com Geração Distribuída**. 2012. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

P. Kundur *et al.*, "**Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions,**" in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1387-1401, Aug. 2004.
doi: 10.1109/TPWRS.2004.825981

Edwards F.V., Dudgeon G.J.W., McDonald J.R. *et al.*, "**Dynamics of distribution networks with distributed generation,**" *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol.2, pp. 1032-1037, Jul 2000.

Buchholz B. M. e Boese C., "**The impact of dispersed power generation in distribution systems,**" *International Symposium on quality and security in electric power delivery systems*, pp. 198-203, Out 2003.

KUNDUR, P. **Power System Stability And Control.** McGraw-Hill, 1994

KUIAVA, R.; RAMOS, R. A.; OLIVEIRA, R.V.DE; BRETAS, N. G. Na **Analysis of Potential Impacts of Electromechanical Oscillation on Stability and Power Quality of Distributed Generation Systems. Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century**, 2008 IEEE. **Anais...** p. 1-7, 2008.

J. Thambirajah, E. Barocio and N. F. Thornhill, "**Comparative review of methods for stability monitoring in electrical power systems and vibrating structures,**" in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 4, no. 10, pp. 1086-1103, October 2010.

R. H. SALIM; R. KUIAVA; R. A. RAMOS; N.G. BRETAS. Impact of power factor regulation on small-signal stability of power distribution systems with distributed synchronous generators. **Electric Power Systems Research**, v. 20, n. 2, p. 1-6, 2010.

BOLLEN, M.; STYVAKTAKIS, E.; GU, I. Y. –H. **Categorization and analysis of power system transient.** *Power Delivery, IEEE Transaction on*, [S.l.] v.20, n.3, p.2298 – 2306, July 2005.

MARPLE, S. L. **Digital Spectral Analysis with Applications.** San Diego, California: Prentice Hall, 1987.

HAUER, J. F.; DEMEURE, C.J.; SCHARF, L. L. Initial results in Prony analysis of power system response signal. **IEEE Transactions on Power Systems Stability Studies**. 2006.

DORIGHELLO, Renato S.; OLIVEIRA, Gustavo H. C.. **EVALUATION OF MATRIX PENCIL ALGORITHMS APPLIED IN ELECTRIC POWER SYSTEMS**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2018.

KUIAVA, Roman; LEANDRO, Gideon Villar; OLIVEIRA, Gustavo Henrique da Costa. **Desenvolvimento de Minirredes com Fontes de Energia Renováveis não Convencionais**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2018. 15 p.