

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

William Resende Rocha

**ANÁLISE E MELHORIA DA ESTABILIDADE ESTÁTICA DE TENSÃO
EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA COM INTEGRAÇÃO DE
USINAS EÓLICAS**

Belo Horizonte
2019

William Resende Rocha

**ANÁLISE E MELHORIA DA ESTABILIDADE ESTÁTICA DE TENSÃO
EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA COM INTEGRAÇÃO DE
USINAS EÓLICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Maury M. Gouvêa Jr.

Linha de pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica

Belo Horizonte
2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

R672a Rocha, William Resende
Análise e melhoria da estabilidade estática de tensão em sistemas elétricos de potência com integração de usinas eólicas / William Resende Rocha. Belo Horizonte, 2019.
71 f.: il.

Orientador: Maury Meirelles Gouvêa Junior

Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

1. Energia eólica. 2. Sistemas de energia elétrica – Estabilidade. 3. Algoritmos. 4. Potência reativa (Engenharia elétrica). 5. Sistemas de conversão de energia eólica. 6. Energia - Fontes alternativas. I. Gouvêa Junior, Maury Meirelles. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.315

William Resende Rocha

**ANÁLISE E MELHORIA DA ESTABILIDADE ESTÁTICA DE TENSÃO
EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA COM INTEGRAÇÃO DE
USINAS EÓLICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica

Prof. Dr. Maury M. Gouvêa Jr. (Orientador) - PUC Minas

Prof. Dr. Pyramo Pires da Costa Júnior – PUC Minas

Prof. Dr. Eduardo Gonzaga da Silveira – CEFET-MG

Belo Horizonte, 30 de julho de 2019

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr Maury Meirelles Gouvêa Jr. pela compreensão, dedicação e paciência cedida durante a elaboração desta dissertação.

À minha família, pelo apoio e incentivo constantes.

A todos os colegas, professores e funcionários da Pós-graduação em Engenharia Elétrica na PUC Minas pela colaboração e ensinamentos que me proporcionaram.

À Capes, pelo financiamento.

RESUMO

Nos últimos anos, a energia eólica tem participado significativamente das matrizes energéticas de vários países, ocasionando mudanças no modo como a energia elétrica é produzida, distribuída e consumida. Os debates sobre como as conexões de usinas eólicas podem impactar no sistema elétrico, preservando a qualidade da energia e estabilidade, tornou-se tema de grande importância para o setor elétrico. As integrações de usinas eólicas no sistema elétrico de potência contribuem para alterações das condições de operação e monitoramento da rede. Em alguns casos usinas eólicas provocam um fraco suporte de potência reativa, ocasionando problemas relacionados a compensação do fluxo de potência e instabilidade de tensão do sistema. Com o efeito da penetração de energia eólica, faz-se necessário a otimização do fluxo de potência nos sistemas elétricos de potência e uma análise da estabilidade de tensão para diferentes configurações e penetrações. Este trabalho utiliza um algoritmo evolucionário para controle de tensão nos barramentos de geração e minimização das perdas de potência reativa. O método proposto tem também como objetivo avaliar a integração de usinas eólicas com base na análise estática da estabilidade de tensão. A integração ocorre de forma individual, em uma usina eólica composta por apenas um tipo de aerogerador e, também, com modelos mistos de aerogeradores. O estudo prevê a melhoria da margem de estabilidade do sistema com integração de aerogeradores, que assumem uma posição importante para o planejamento energético. Para validação do método proposto, vários experimentos foram realizados com os sistemas IEEE 9, 14 e 118 barras, considerando diferentes cenários de disposição e nível de penetração das usinas eólicas.

Palavras-chave: Estabilidade de tensão. Usina eólica. Análise estática. Algoritmo evolucionário.

ABSTRACT

In recent years, the wind energy has participated significantly into the energy matrices of several countries, providing changes in the form in which the electrical energy is produced, distributed, and consumed. The debates on how the wind power plants can impact into the electrical system, preserving the energy quality and stability, has become an essential topic in the electrical sector. The participating of wind power plants in the power system contribute to changes in the operating conditions. In some cases wind power plants cause weak support to reactive power, causing problems related to the power flow compensation and voltage instability of the system. Regarding the effect of wind energy participating, the optimization of the power flow in the power systems and an analysis of the voltage stability for different configurations and participating are necessary. This work uses an evolutionary algorithm for voltage control in generation buses and minimization of the reactive power losses. The proposed method aims to evaluate the integration of wind power plants based on the static analysis of voltage stability. The integration takes place individually, in a wind power plant composed of only one type of turbine and, simultaneous, in plants with two types of turbine. The study also provides an improvement of the system stability margin with the integration of wind turbines, which assume an important position for energy planning. In order to validate the proposed method, several experiments were conducted by using the standard 9, 14, and 118-buses IEEE systems, regarding different participating scenarios of wind power plants.

Keywords: Voltage stability. Wind power Plant. Static analysis. Evolutionary algorithm.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Evolução da capacidade instalada de energia eólica no Brasil	4
FIGURA 2 – Composição da matriz de energia eólica brasileira	5
FIGURA 3 – Aerogerador de eixo horizontal	12
FIGURA 4 – Estrutura de um aerogerador de eixo horizontal	13
FIGURA 5 – Gerador de indução conectado diretamente a rede elétrica - SCIG .	14
FIGURA 6 – Gerador de indução conectado diretamente a rede elétrica - DFIG .	15
FIGURA 7 – Curva PV	19
FIGURA 8 – Curva VQ	20
FIGURA 9 – Fluxograma do método implementado	26
FIGURA 10 – Fluxograma do algoritmo evolucionário	27
FIGURA 11 – Codificação das variáveis de decisão como genes	28
FIGURA 12 – Cruzamento por corte simples	29
FIGURA 13 – Processo de mutação	30
FIGURA 14 – Melhores indivíduos de todos experimentos	32
FIGURA 15 – Sistema IEEE 14 barras	33
FIGURA 16 – Fator de participação dos barramentos	35
FIGURA 17 – Curvas PV – Sem integração de usinas eólicas	36
FIGURA 18 – Curvas VQ – Sem integração de usinas eólicas	37
FIGURA 19 – Curvas PV - Integração de DFIG (5%)	38
FIGURA 20 – Curvas VQ - Integração de DFIG (5%)	39
FIGURA 21 – Sistema IEEE 118 barras	44
FIGURA 22 – Fator de participação dos barramentos 43,44 e 45	45
FIGURA 23 – Sistema IEEE 9 barras	47

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Potência eólica instalada no Brasil	3
TABELA 2 – Genes do melhor indivíduo	32
TABELA 3 – Autovalores - IEEE 14	34
TABELA 4 – Margens de Estabilidade do Sistema IEEE 14	35
TABELA 5 – Geração Eólica	39
TABELA 6 – Margens de Estabilidade do Sistema IEEE 14 – Integração de aerogerador DFIG (5%) / Barramento 14	40
TABELA 7 – Margens de Estabilidade do Sistema IEEE 14 – Integração de DFIG (5%) / Barramento 5	41
TABELA 8 – Margens de Estabilidade do Sistema IEEE 14 - Integração de DFIG (5%) / Barramentos 10 e 14	41
TABELA 9 – Margens de Estabilidade do Sistema IEEE 14 - Integração de SCIG (5%) / Barramento 14	42
TABELA 10 – Margens de Estabilidade do Sistema IEEE 14 - Integração de DFIG e SCIG (5%) / Barramento 14	43
TABELA 11 – Margens de Estabilidade do Sistema IEEE 9 - Integração de DFIG (15,75 MW) / Barramento 5	48
TABELA 12 – Margens de Estabilidade do Sistema IEEE 9 - Integração de DFIG (15,75 MW) / Barramento 9	48

LISTA DE SIGLAS

AG	–	Algoritmo Genético
ANEEL	–	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	–	Corrente Alternada
CC	–	Corrente Contínua
DFIG	–	<i>Doubly fed Induction Generator</i>
FCWG	–	<i>Full-converter Wind Generator</i>
FRC	–	<i>Full Rated Converter</i>
GSC	–	Conversor do lado da rede
GW	–	GigaWatt
kW	–	kiloWatt
MW	–	MegaWatt
OEL	–	Limitador de sobre-excitação de corrente de campo
OLCT	–	Transformador com comutador de tap sob carga
ONS	–	Operador Nacional do Sistema Elétrico
RSC	–	Conversor do lado da rotor
SCIG	–	<i>Squirrel Cage Induction Generator</i>
SEP	–	Sistema Elétrico de Potência
SIN	–	Sistema Interligado Nacional
VCPI	–	<i>Voltage Colapse Proximity Indicator</i>
VSI	–	<i>Voltage Stability Index</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	3
1.1 Objetivos	6
1.2 Justificativa	6
1.3 Trabalhos relacionados	7
1.4 Organização do trabalho	9
2 SISTEMAS DE GERAÇÃO EÓLICA	11
2.1 Principais componentes do sistema eólico	11
2.2 Sistemas eólicos de velocidade constante	14
2.3 Sistemas eólicos de velocidade variável	15
2.4 Discussões finais	16
3 ESTABILIDADE DE TENSÃO	17
3.1 Análise estática	17
3.1.1 <i>Curvas PV</i>	18
3.1.2 <i>Curvas VQ</i>	20
3.1.3 <i>Análise modal</i>	21
3.2 Discussões finais	23
4 ESTABILIDADE ESTÁTICA DE SISTEMAS ELÉTRICOS COM IN- TEGRAÇÃO DE GERADORES EÓLICOS	25
4.1 Algoritmos evolucionários	26
4.1.1 <i>Estrutura do indivíduo</i>	28
4.1.2 <i>Cruzamento</i>	28
4.1.3 <i>Mutação</i>	28
4.2 Função objetivo – <i>Fitness</i>	29
4.3 Discussões finais	29
5 ESTUDO EXPERIMENTAL	31
5.1 Parâmetros do algoritmo evolucionário	31
5.2 Otimização do sistema	32
5.3 Experimentos com o sistema IEEE 14 barras	33

5.3.1	<i>Análise modal – Fator de participação</i>	33
5.3.2	<i>Cenário I – Sistema sem integração de usinas eólicas</i>	34
5.3.3	<i>Cenário II – Aerogerador DFIG</i>	38
5.3.4	<i>Cenário III – Aerogerador SCIG</i>	42
5.3.5	<i>Cenário IV – Aerogeradores DFIG e SCIG</i>	42
5.4	Sistema IEEE 118 barras	43
5.4.1	<i>Análise modal – Fator de participação</i>	45
5.4.2	<i>Cenário I – Sistema sem integração de usinas eólicas</i>	45
5.4.3	<i>Cenário II – Aerogeradores DFIG</i>	46
5.5	Sistema IEEE 9 barras	47
5.6	Discussões finais	48
6	CONCLUSÃO	51
6.0.1	<i>Trabalhos futuros</i>	52
	REFERÊNCIAS	53
	APÊNDICE A - Dados dos tipos de aerogeradores	57
	APÊNDICE B - Dados das redes de teste	59

1 INTRODUÇÃO

Com a grande demanda por energia elétrica, aumento dos preços de fontes não-renováveis e pressões ambientais, as fontes de energias renováveis, em especial os parques eólicos, têm sido fonte de atenção nos últimos anos (GWEC, 2017). A capacidade de geração eólica mundial instalada em 2018 alcançou 591 GW, deste montante 51,3 GW foi instalada neste mesmo ano. O Brasil figura entre as principais potências globais em capacidade instalada, sendo o quinto produtor na escala mundial. No ano de 2018, tinha 14,71 GW instalados, distribuídos em 583 usinas eólicas em operação comercial e mais de 7.000 aerogeradores em 12 estados, conforme mostra a Tabela 1 (ABEEOLICA, 2019).

Tabela 1 – Potência eólica instalada no Brasil

<i>Estado</i>	<i>Potência (MW)</i>	<i>Nº de Parques</i>
Rio Grande do Norte	4.043,1	150
Bahia	3.572,5	135
Ceará	2.050,5	80
Rio Grande do Sul	1.831,9	80
Piauí	1.638,1	60
Pernambuco	782,0	34
Maranhão	328,8	12
Santa Catarina	238,5	14
Paraíba	157,2	15
Sergipe	34,5	1
Rio de Janeiro	28,1	1
Paraná	2,5	1
Total	14.707,7	583

Fonte: Adaptado de ABEEOLICA (2019)

Considerando a geração por estado, o Rio Grande do Norte lidera a cadeia de produção de energia eólica com capacidade instalada de 4.043,1 MW, seguido por Bahia e Ceará com capacidade instalada de 3.572,5 MW e 2.050,5 MW, respectivamente. A região nordeste tem uma representatividade de 85,7% de toda a energia eólica produzida no Sistema Interligado Nacional (SIN).

O Brasil tem papel de liderança na América do Sul, com capacidade instalada de 728,8% superior ao segundo colocado, Chile (1.774,9 MW), e responsável por 71,3% de toda a produção do território sul-americano. Além dos 14,71 GW de capacidade instalada, há outros 4,33 GW já contratados em construção ou projeto (ABEEOLICA, 2019). Trata-se de um crescimento acelerado na última década, como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Evolução da capacidade instalada de energia eólica no Brasil



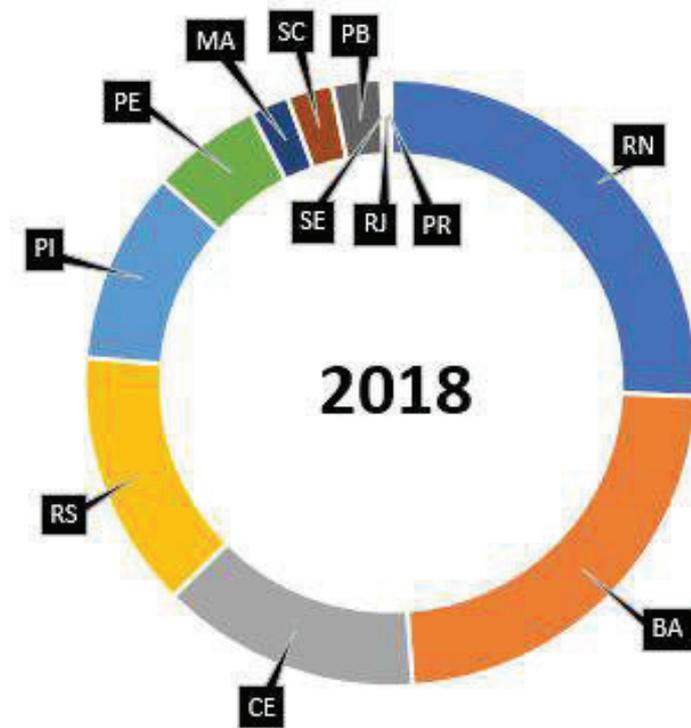
Fonte: (ABEEOLICA, 2019).

No território brasileiro, como apresentado a distribuição entre os estados na Figura 2, a participação da energia eólica alcançou o patamar de 9% de toda a matriz elétrica no final de 2018, ocupando a terceira posição como fonte geradora. Há perspectivas que a produção de energia eólica assuma a segunda posição no ano de 2019, ficando atrás apenas da geração hidrelétrica, que hoje representa 60,4% (98,3 GW) de toda a produção nacional (ABEEOLICA, 2019).

Durante o período seco de 2018, maio a novembro, as usinas eólicas chegaram a atender quase 14% do SIN, garantindo capacidade maior de armazenamento para os reservatórios de hidrelétricas. Esse suporte dos parques eólicos só é possível no período de estiagem, uma vez que os ventos possuem velocidade maior e conseqüentemente assumem papel essencial na regulação de tarifas, evitando que termoeletricas sejam ativadas (ONS, 2019).

O rápido crescimento na utilização de energia eólica no Brasil e no mundo tem se mostrado benéfico ambientalmente; porém, a adição de novas fontes de energia em linhas

Figura 2 – Composição da matriz de energia eólica brasileira



Fonte: Elaborado pelo autor.

de transmissão existentes é um desafio para os sistemas elétricos de potência. O problema da estabilidade de tensão se deve, em parte, quando os sistemas operarem perto de seus limites de capacidade, podendo ser agravado pelo tipo de aerogerador utilizado nas usinas eólicas (AZZAM; FEILAT; AL-SALAYMEH, 2017).

Os aerogeradores podem ter velocidade constante ou variável. Cronologicamente, os sistemas eólicos de velocidade constante foram os primeiros sistemas de grande porte instalados no mundo (SHARMA; GANNESS, 2007). Os primeiros sistemas eólicos eram constituídos por aerogeradores que utilizavam motor de indução com rotor em gaiola, e foram denominados por SCIG (do inglês, *Squirrel Cage Induction Generator*), eles se caracterizavam por terem velocidade constante, e o gerador de indução com rotor em gaiola conectado diretamente à rede através de um transformador (SHARMA; GANNESS, 2007).

Nos sistemas eólicos constituídos de aerogeradores compostos por turbinas de velocidade variável, também denominados DFIG (do inglês, *Doubly Fed Induction Generator*), utilizam motor de indução com rotor bobinado, neles a frequência da rede elétrica é desacoplada da frequência do rotor a partir da utilização de conversores estáticos de eletrônica de potência. Tais conversores possibilitam a operação em velocidade variável do rotor da turbina eólica. Os aerogeradores do tipo DFIG são as mais utilizadas atualmente nos projetos de parques eólicos (SHARMA; GANNESS, 2007).

Este trabalho apresenta um estudo sobre o impacto da integração de usinas eólicas

do tipo SCIG e DFIG na estabilidade de tensão do sistema elétrico. A integração dos aerogeradores ocorre de forma individual, em uma usina eólica composta por apenas um tipo de aerogerador; e de forma simultânea, em que dois aerogeradores fazem parte da integração no sistema. A investigação realizada nesta dissertação foi desenvolvida com base nos métodos de análise estática, que caracterizam um importante estudo em relação à distância do ponto de operação ao limite de estabilidade. O estudo também prevê a melhoria da margem de estabilidade com a integração desses aerogeradores utilizando os métodos de análise modal e um algoritmo evolucionário para otimização do despacho de potência reativa, abordando tanto a localização como o nível de penetração das usinas eólicas no sistema. A investigação preliminar do problema e seus resultados foram publicados na XVI Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (XVI CEEL), ocorrida na Universidade Federal de Uberlândia, em 2018 (ROCHA; GOUVÊA JR., 2018).

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é analisar o impacto da penetração de usinas eólicas no sistema elétrico, e avaliar a melhoria da estabilidade estática da tensão com a integração de usinas com aerogeradores dos tipos SCIG e DFIG. Os objetivos específicos são apresentados a seguir:

- Estudar os diversos métodos de análise estática de estabilidade de tensão e analisar suas aplicabilidades ao problema proposto;
- Implementar um método, baseado em algoritmo evolucionário, para encontrar o despacho ótimo de potência reativa a partir da penetração de usinas eólicas no sistema elétrico;
- Analisar o impacto da integração de aerogeradores dos tipos SCIG e DFIG em apenas um ponto do sistema e em múltiplas localidades; e

1.2 Justificativa

A busca por fontes alternativas de energia renovável, visando a diversificação da matriz energética global, tem sido constante e suprida pela expansão da energia eólica instalada no mundo. Em função do crescimento da capacidade instalada de fontes de energia eólica, sem a construção de novas linhas de transmissão, o sistema está sujeito a problemas de estabilidade de tensão.

Um exemplo do problema de se operar perto dos limites de capacidade, são os graves incidentes verificados ao redor do mundo nas últimas décadas, como na França, em 1978 e 1987; Bélgica, em 1982; Suécia, em 1983; Brasil, em 1986; Japão, em 1970 e 1987; USA, em 1994, 1996 e 2003; e Alemanha, em 2006 (FRANCISCO, 2005). Todos esses eventos levaram os sistemas ao apagão, total ou parcial.

O estudo da estabilidade de tensão a partir do aumento da penetração das usinas eólicas pode destacar pontos sensíveis do sistema elétrico, permitindo o planejamento de medidas que minimizem esses efeitos. O foco em aerogeradores do tipo SCIG e DFIG se justifica pela ampla utilização dessas configurações em parques eólicos e por suas características opostas do ponto de vista do problema da potência reativa. O tema estudado neste trabalho figura entre os principais temas da área e serve como base para estudos futuros relacionados a qualidade de energia.

1.3 Trabalhos relacionados

A análise da integração de usinas eólicas e seus efeitos na estabilidade de tensão do sistema tem atraído a atenção de diversos pesquisadores (RAWAT; VADHERA, 2016). Problemas na estabilidade de tensão são recorrentes em sistemas com grande penetração de energia eólica, uma vez que a instabilidade se deve em parte aos sistemas operarem perto de seus limites de capacidade, da disposição das usinas eólicas e do tipo de aerogerador utilizado (AMARASEKARA et al., 2016). O impacto na estabilidade do sistema se torna especialmente desafiador com a integração de aerogeradores SCIG, já que esses aerogeradores absorvem grande quantidade de potência reativa contribuindo para problemas na estabilidade de tensão dos barramentos (MASAUD; NANNAPANENI; CHALLOO, 2017).

Mathe e Folly (2017) por meio de curvas PV, VQ e análise das margens de estabilidade, investigaram o impacto da integração de energia eólica no sistema por aerogeradores de velocidade constante e variável. Os resultados mostraram que em um cenário onde apenas aerogeradores de velocidade constante são utilizadas, um impacto negativo na estabilidade de tensão é notado. Por outro lado, a utilização de aerogeradores de velocidade variável contribui para aumento da margem de estabilidade devido ao controle de sua produção de potência reativa. A análise se mostra limitada em função do sistema utilizado para integração dos parques eólicos, apenas 5 barramentos, e deixa aberta a possibilidade de estudos mais complexos.

Dando continuidade ao estudo de integração de usinas eólicas, Amarasekara *et al.* (2016) investigam a melhor localização para instalação de aerogeradores de velocidade variável, do tipo DFIG, considerando a estabilidade de tensão do sistema. Métodos de curva VQ e análise modal foram utilizados para identificação dos barramentos mais sensíveis e consequentemente, demonstrar que a integração de energia eólica proporciona um ganho superior na margem de estabilidade do sistema quando adicionada a esses barramentos. O estudo foca nos aerogeradores DFIG e serve como base para análises mais profundas com a inclusão de aerogeradores de velocidade fixa.

Visando expandir a abrangência de seus estudos, Amarasekara *et al.* (2017) investigam os impactos na estabilidade de tensão com o aumento da penetração de energia eólica fornecida por aerogeradores de velocidade variável de diferentes tipos. Os aerogeradores

DFIG e FCWG (do inglês, *full-converter wind generator*) foram alvo de estudo neste artigo. Os resultados, considerando a curva de capacidade de cada aerogerador, apresentam os efeitos da integração nas proximidades de centros de carga e o suporte de reativo de cada aerogerador para condições distintas de vento. Os aerogeradores de velocidade fixa não foram contempladas na análise.

Ainda no grupo dos aerogeradores de velocidade variável, Londero, Affonso e Vieira (2015) analisaram o impacto da integração de aerogeradores de velocidade variável considerando suas curvas de capacidade, limitador de sobre-excitação da corrente de campo (OEL) e transformador com comutador de tap sob carga (OLTC). A utilização de curvas PV indicaram que o aumento da penetração de energia eólica é benéfico para a estabilidade de tensão do sistema e que o controle de reativo desses aerogeradores tem papel fundamental no aumento da margem de estabilidade.

Naser *et al.* (2010) estudaram a estabilidade de tensão a partir do método VCPI (*Voltage Collapse Proximity Indicator*) considerando a integração de aerogeradores DFIG e a natureza intermitente do vento em múltiplos pontos do sistema simultaneamente. Seus resultados mostram que a integração em dois ou mais pontos melhoram as margens de estabilidade do sistema se comparada a apenas um ponto. O estudo foi desenvolvido em um sistema IEEE 30 barras e sua simulação realizada no software Powerworld.

De forma semelhante, Panda *et al.* (2014) utilizaram o método L-index para identificar possíveis compensações de reativo observando os barramentos mais sensíveis do sistema. Seus resultados mostram que a variação da carga e, conseqüentemente, a variação da penetração de energia eólica, causam uma mudança na margem de estabilidade dos barramentos mais críticos. Essas mudanças dependem das localizações das usinas eólicas e da configuração do sistema.

Os aerogeradores de velocidade fixa também se destacam nos estudos de integração em função dos seus efeitos no sistema. Almeida *et al.* (2013) faz uso de curvas PV, VQ e das margens de estabilidade para analisar a integração de geração distribuída, composta por aerogeradores SCIG, em múltiplos pontos do sistema. A margem de estabilidade em cada barramento foi monitorada para uma geração intermitente e variações na carga. Os resultados apresentam o risco de colapso associado a diferentes níveis de operação do sistema.

Em sequência aos estudos da integração, Masaud, Nannapaneni e Chaloo (2017) investigam o impacto da geração distribuída, composta por aerogeradores do tipo SCIG e DFIG na estabilidade de tensão. Uma metodologia foi proposta para localização ótima das usinas eólicas considerando a demanda de reativo desses aerogeradores e sua compensação baseada em uma função custo. Embora a metodologia seja detalhada e abrangente, seus testes se limitaram a sistemas de 30 barras.

Azzam, Feilat e Salaymeh (2017) analisaram o impacto da geração distribuída no sistema elétrico da Jordânia, em especial a geração eólica e a influência do vento na

estabilidade de tensão do sistema. A análise foi feita utilizando métodos baseados nas margens de estabilidade das curvas PV, o qual permite identificar o limite de capacidade da rede e possíveis modificações. Os resultados sugerem níveis máximos de integração e ampliações necessárias para suportar a potência desejada considerando a estabilidade de tensão do sistema.

A escolha pelos métodos de análise desta dissertação resultou do estudo desenvolvido por Li *et al.* (2014), no qual foram utilizados os métodos Modal, L-index e Sensibilidade QV para analisar a integração de energia eólica no sistema. Quando comparados, os métodos Modal e L-index apresentam maior sensibilidade para variação na penetração e localização da integração. Além disso, a estabilidade de tensão tende a diminuir para integrações em áreas de geração, enquanto aumenta para integrações próximas as áreas de carga.

Embora a literatura apresente uma ampla investigação para discutir o impacto da integração de energia eólica na estabilidade de tensão do sistema elétrico, poucos estudos foram realizados considerando a integração simultânea de aerogeradores de velocidades fixa e variável. Este estudo vem justamente atender essa demanda e investigar um assunto de destaque na área de sistemas de energia.

1.4 Organização do trabalho

Este trabalho está organizada como segue:

- O capítulo 2 apresenta os tipos de sistemas eólicos, velocidade fixa e velocidade variável, e aborda o impacto dos parques na qualidade de energia elétrica, com foco na estabilidade de tensão dos sistemas elétricos de potência.
- O capítulo 3 apresenta conceitos fundamentais sobre estabilidade de tensão que servem como embasamento para entendimento do problema e soluções propostas.
- O capítulo 4 apresenta a metodologia empregada para aquisição dos dados e detalhes dos testes realizados e implementados na plataforma de simulação Matlab e pacote Matpower.
- O capítulo 5 apresenta os resultados referentes ao estudo de caso, onde foi avaliada a estabilidade de tensão do sistema a partir da integração de usinas eólicas com características diversas.
- Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões extraídas dos estudos realizados e introduzidas sugestões, para trabalhos futuros, relacionadas a melhoria de estabilidade de tensão do sistema.