

## INTEGRAÇÃO DE CENTRAIS EÓLICAS NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA DO PIAUÍ

Bartolomeu Ferreira dos Santos Junior  
André Luís Araújo Andrade  
Fabiola Maria Alexandre Linard  
Aryfrance Rocha Almeida

*Universidade Federal do Piauí*

### RESUMO

A utilização de fontes limpas na geração de energia elétrica vem aumentando consideravelmente nas últimas décadas, não somente em países desenvolvidos, mas também em países em desenvolvimento como o Brasil. A geração eólica tem despertado grande interesse no cenário nacional, principalmente devido ao seu nível de desenvolvimento e ao potencial ainda não explorado em vários estados brasileiros. Neste trabalho, são apresentados dados sobre a integração de centrais eólicas no sistema de potência do estado do Piauí, exibindo o cenário atual do estado e projetando um cenário futuro com base nas informações dos empreendimentos relacionados à geração de energia elétrica.

Palavras-chave: Energia eólica, sistema elétrico de potência, centrais eólicas, gerador de indução duplamente alimentado.

### ABSTRACT

Environmental politics have been encouraging the use of the renewable source of Electrical Power, and among these the most noticeable one in the Brazilian Power System scenario is Wind power, which accounts for more than 4% of the total national installed power capacity, and has high prospects to reach almost 10% at the end of the construction of every project planned by the government. Despite the fact that wind power production is expanding in Brazil. This work presents data about the integration of wind farms into the power system of the state of Piauí, displaying the current scenario of the state and projecting a future scenario based on information from projects related to power generation.

Key words: Wind Energy, power system, wind farm, Double fed induction generator (DFIG).

## 1. INTRODUÇÃO

O primeiro moinho de vento, utilizado para geração de energia elétrica, foi arquitetado pelo engenheiro eletricista James Blyth, na cidade de Glasgow, Escócia, no ano de 1887. Na mesma época, uma turbina de 144 pás, foi construída em Ohio nos Estados Unidos, pela empresa de Charles F. Brush, que apresentava uma pequena geração de energia devido ao número excessivo de pás (MATTOS et al., 2010). A tecnologia foi aperfeiçoada por meio do trabalho do físico e meteorologista dinamarquês Poul La Cour, que utilizou princípios científicos que influenciam a tecnologia empregada ainda hoje (PINTO, 2013). Verificou que, um menor número de pás no rotor era muito mais eficiente do que as turbinas de muitas pás e que, alterando algumas particularidades mecânicas das turbinas, aumentaria o rendimento. Seus apontamentos levaram a Dinamarca a instalar uma potência de 3 MW, em 1918, o que correspondia na época a 3% do consumo do país (SINTRA, 2013). O desenvolvimento da tecnologia tem conduzido ao aumento da altura das torres, a dimensão das pás e a capacidade de carga, permitindo alcançar fatores de capacidade maiores para as mesmas velocidades de vento (FALANI et al., 2015).

### 1.1 Panorama internacional e nacional

Os países da Europa, em 2011, tiveram uma participação de 43% na geração de energia elétrica por fonte eólica. Esta expansão ocorreu principalmente pelo incentivo que os países creditaram ao projeto de energia eólica, garantindo incentivos fiscais e econômicos, relacionando ao desenvolvimento sustentável (MORELLI, 2012). A China teve a segunda posição nesta representação com 33% da capacidade instalada, seguida pela América do Norte com 22% (SILVA, 2015).

No Brasil, tem aumentado a capacidade instalada de energia eólica devido ao grande potencial eólico existente, especialmente nas regiões nordeste e sul do país, bem como devido à diminuição do preço final de energia, motivado por melhorias nas tecnologias de turbinas eólicas, geradores e plantas, aliados ao modelo de expansão nacional da geração com base em leilões de energia (GOMES et al., 2017). Durante o ano de 2014, quando o Brasil entrou para o rol dos maiores produtores mundiais de energia eólica, houve um incremento de 2.472 MW na capacidade instalada de geração de energia eólica, segundo a *Global Wind Energy Council* (GWEC, 2015), o que na época correspondeu a um crescimento superior a 70%. No ano de 2015, esse número ultrapassou 6,5 GW e se aproximará de 16 GW após a conclusão da construção de todos os empreendimentos previstos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (GWEC, 2015; ANEEL, 2015), com



participação da energia elétrica produzida por empreendimentos de Produtores Independentes Autônomos, concebidos com base em fontes eólica, [...]”.

A Resolução Normativa nº391/2009 (ANEEL,2009), “estabelece os requisitos necessários à outorga de autorização para exploração e alteração da capacidade instalada de centrais eólicas”. No artigo 12, a ANEEL analisará o estudo do potencial eólico, a capacidade instalada e o acesso da conexão para transmissão e distribuição.

Segundo o inciso I do artigo 2º da Resolução Normativa nº462/2014 (CONAMA,2014), considera os empreendimentos eólicos como:

[...] qualquer empreendimento de geração de eletricidade que converta a energia cinética dos ventos em energia elétrica, em ambiente terrestre, formado por uma ou mais unidades aerogeradoras, seus sistemas associados e equipamentos de medição, controle e supervisão, classificados como: a) usina eólica singular: unidade aerogeradora, formada por turbina eólica, geradora de energia elétrica; b) parque eólico: conjunto de unidades aerogeradoras; c) complexo eólico: conjunto de parques eólicos.

Em relação ao licenciamento ambiental, a Resolução nº462/2014, indica os procedimentos necessários, como é elucidado no artigo 1º, “[...] estabelece critérios e procedimentos para o licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica a partir de fonte eólica em superfície terrestre”.

Neste trabalho foi realizado o levantamento de informações sobre os complexos eólicos instalados no estado do Piauí, evidenciando a configuração de cada complexo, bem como a forma que estes irão ser conectados ao SIN.

Foram realizadas simulações utilizando um modelo de usina eólica, que possuem turbinas com geradores indutivos duplamente alimentados (GIDA), fornecido pelo Matlab®.

## 2. SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA DO PIAUÍ

Até meados dos anos de 1970, a energia elétrica utilizada no Piauí era gerada por meio de sistemas térmicos isolados, a lenha ou óleo diesel. Em virtude da necessidade de impulsionar o setor industrial e a economia do estado, em 1961 foi criada a COHEBE (Companhia Hidrelétrica de Boa Esperança), criada com a finalidade de construir a Usina Hidrelétrica de Boa Esperança. Já em 1962, criava-se a CEPISA (Centrais Elétricas do Piauí S.A), tendo como objetivo a eletrificação do

estado, por meio de um sistema integrado de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. A construção da Usina Hidrelétrica de Boa Esperança, com uma potência total de 110 MW, impulsionou a economia do estado do Piauí, aliada aos investimentos federais na época (RODRIGUES, 2001). Devido a construção desta hidrelétrica, as usinas termelétricas foram progressivamente sendo desativadas.

Outra fonte renovável que ganhou destaque no Piauí foi a energia eólica. O uso dos ventos para a geração de energia no estado do Piauí teve início em 2008 com a inauguração da Central Eólica da Pedra do Sal, pela empresa Tractebel Energia. Foi um passo importante para diversificar a matriz energética piauiense. O grau dos efeitos, advindos da geração de energia eólica, depende principalmente do grau de penetração desta na rede e também do nível de robustez do sistema. No caso do estado do Piauí, o grau de penetração de energia eólica é baixo e o SEP pode ser considerado robusto por ser integrado ao SIN.

Embora, até o ano de 2017, o estado do Piauí ainda não tenha atingindo picos de demanda superiores a 1000 MW e a capacidade instalada de geração de energia elétrica seja superior a esse valor, mesmo após a integração dos novos complexos eólicos ao SEP do Piauí, o estado ainda não será autossuficiente no que diz respeito ao suprimento da sua demanda energética visto que a energia elétrica produzida pelos complexos eólicos não poderá ser totalmente injetada no sistema de distribuição do estado devido às restrições técnicas quanto aos níveis de penetração da mesma em um sistema de potência.

Na Tabela 1 são mostrados os dados disponibilizados pela ANEEL sobre a capacidade instalada de geração de energia elétrica no estado Piauí antes e depois da construção dos complexos eólicos que estão sendo instalados no estado.

Os dados da Tabela 1 mostram que a matriz energética do estado do Piauí será consideravelmente modificada após a finalização da construção dos novos empreendimentos, o que permite a criação de dois cenários para o SEP do Piauí, um anterior e outro posterior ao início operacional dos complexos eólicos.

No primeiro cenário, a geração hidroelétrica corresponde a 61,14%, as gerações eólicas e termoelétricas correspondem a 22,67% e 16,18%, respectivamente. No segundo, a geração eólica corresponde a 75,73% da capacidade de geração instalada do estado, seguida pela geração fotovoltaica com 11,19% da capacidade de geração do estado, e as gerações hidroelétricas e termelétrica com 9,83% e 3,24%, respectivamente.

Tabela 1 - Potência outorgada dos empreendimentos no Estado do Piauí (Aneel, 2018)

Tipo	Empreendimentos em operação (Abril / 2015)		Todos os empreendimentos após conclusão das obras (2018 - 2020)	
	Potência outorgada (kW)	%	Potência outorgada (kW)	%
Central Geradora Elétrica	88.000	22,67	1.827.100	75,73
Central Geradora Fotovoltaica	0,0	0,0	270.00	11,19
Usina Hidroelétrica	237.300	61,14	237.300	9,83
Usina Termoelétrica	62.815	16,18	78.286	3,24
Total	388.115	99,99	2.412.686	99,99

## 2.1 Cenário atual

As centrais eólicas em operação no estado do Piauí, anteriores a construção dos complexos eólicos localizados no sudeste do estado, concentram-se na região litorânea e juntas possuem capacidade instalada de geração de 88 MW.

A usina Eólica da Pedra do Sal possui capacidade instalada de 18 MW, que corresponde a 20 aerogeradores do tipo E-44/900 kW fabricados pela Wobben/Enercon, que possuem geradores síncronos de baixa velocidade e que operam a velocidade variável, sendo que a linha de transmissão utilizada é de 138 kV conectada à uma subestação de distribuição. Provavelmente devido ao elevado custo desse tipo de turbina quando comparado com os demais modelos, essa é a única central que utiliza esse tipo de turbina no estado.

As centrais do Delta do Parnaíba, Porto das Barcas e Porto Salgado possuem capacidade instalada de 30 MW, 20 MW e 20 MW, respectivamente, utilizando turbinas produzidas pela empresa Vestas, que possuem geradores indutivos duplamente alimentados, controle de

passo e sistema de regulação de potência ativa e reativa que visa manter o equilíbrio de tensão no ponto de conexão, também conectados a uma SE de distribuição por meio de uma LT de 138 kV. Esse tipo de gerador opera em velocidade variável sob um grande, mas restrito, intervalo de velocidades, assim permitindo a busca pela máxima produção de potência a partir do controle da velocidade rotacional do mesmo. Outras vantagens são o controle individual de potência ativa e reativa, a sua auto-magnetização, sua capacidade de geração de potência reativa, e um aumento de 2 a 3% da capacidade de geração devido ao tipo de conexão adotada. Tendo como desvantagem a necessidade do uso de anéis coletores e de um conversor que gera harmônicos que devem ser extintos através do uso de filtros, que por sua vez aumentam os custos da implantação da usina (CUSTÓDIO, 2009 ; KHALIGH, 2010).

Como visto, todas as centrais localizadas no norte do estado são conectadas a rede de distribuição por meio de linhas de transmissão de 138 kV. Isso só foi viável devido à baixa capacidade de geração instalada das mesmas e ao baixo nível de penetração da energia eólica na localidade. O mesmo tipo de conexão não será aplicado aos novos complexos eólicos devido à grande capacidade instalada, o que resultaria em uma considerável penetração da energia eólica no SEP do Piauí podendo causar problemas relacionados a qualidade da energia e instabilidade no sistema. Portanto, estes complexos eólicos serão conectados ao SIN por meio de LT exclusivas, o que reduzirá os impactos na qualidade da energia fornecida ao consumidor final e possuirá apenas a desvantagem de possuir custo mais elevado do que a conexão por meio de linhas de transmissão de média tensão (MOHOD e AWARE 2013).

## 2.2 Cenário futuro

Os complexos eólicos que ainda estão sendo construídos ou que entraram recentemente em operação são: o Complexo Eólico Chapada do Piauí, o Complexo Eólico Chapada do Piauí II e o Complexo de Caldeirão do Piauí, que possuirão capacidade instalada de geração de 415,1 MW, 231,6 MW e 415,8 MW, respectivamente, após a finalização da construção das centrais de cada complexo. Possuindo turbinas com geradores do tipo indutivo duplamente alimentado e conexão ao SIN por meio de LT de 230 kV e 500 kV, uma parte do Complexo Chapada do Piauí se conectará a SE Picos e a outra parte, assim como os outros complexos, se conectarão a uma subestação seccionadora que será oriunda do seccionamento da LT já existente de 500 kV que vai da subestação de São João do Piauí para Milagres no estado do Ceará. Após a criação da subestação seccionadora e das subestações

elevadoras, o SEP do estado do Piauí sofrerá algumas modificações que resultarão em uma configuração semelhante a apresentada na Figura 2, que apresenta modificações feitas a ilustração exibida no website da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF).

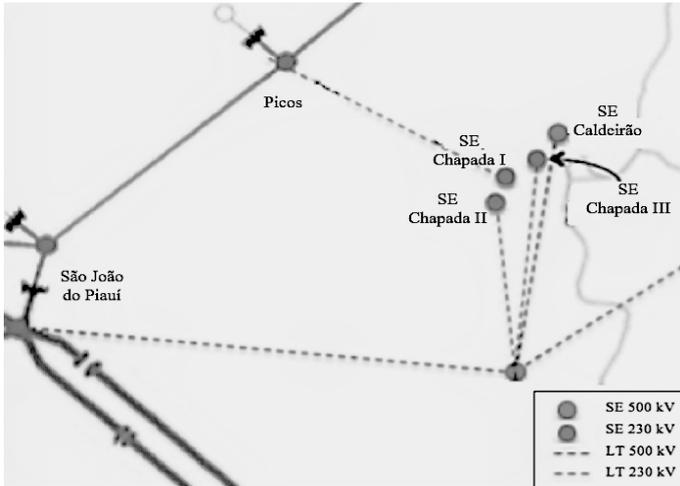


Figura 2 - SEP do Piauí após a integração dos novos complexos eólicos

### 3. COMPLEXOS EÓLICOS INTEGRADOS AO SISTEMA DE POTÊNCIA DO PIAUÍ

Os complexos eólicos instalados na região sudeste do Piauí possuem algumas características similares entre si, como o tipo de turbina eólica utilizada e o sistema de elevação de tensão. Porém, as turbinas utilizadas podem possuir configurações diferentes, como valor de potência unitária, por possuírem fabricantes distintos, o que afeta a quantidade de turbinas eólicas utilizadas em cada complexo e a potência total dos parques eólicos contidos em cada complexo.

#### 3.1 Complexo Eólico Chapada do Piauí

O Complexo Eólico Chapada do Piauí possui capacidade instalada de geração de 415,1 MW e é composto por 14 parques eólicos, como mostrado na Tabela 2, contida no Relatório de Impacto Ambiental do Complexo Eólico Chapada do Piauí.

Os *hubs* das turbinas são posicionados em diferentes altitudes de acordo com o modelo da turbina. Por exemplo, o *hub* dos modelos

GE está posicionado a 80 metros de altura, enquanto que o das turbinas Games está posicionado a uma altura de 78 metros.

Este complexo possuirá duas subestações, a SE Chapada I e a SE Chapada II, sendo que os sete primeiros parques eólicos da Tabela 1 estão conectados a SE Chapada I e os sete últimos parques estão conectados a SE Chapada II. A conexão desse complexo eólico ao SIN será feita por meio de duas linhas de transmissão que podem ser vistas na Figura 2, a LT de 230 kV que irá da SE Chapada I para a SE Picos e a LT de 230 kV que irá da SE Chapada II para a Subestação Seccionadora que será construída.

O Complexo Eólico Chapada do Piauí possui turbinas com geradores de indução duplamente alimentados cuja tensão de saída é 690 V. Com o objetivo de minimizar perdas na transmissão, a tensão de saída é elevada para 34,5 kV por transformadores instalados próximos a cada turbina. Após a elevação do nível de tensão a energia gerada vai para um sistema coletor que transporta toda a energia produzida pelas turbinas para uma subestação elevadora e posteriormente para o SIN.

Tabela 2 - Parques do Complexo Eólico Chapada do Piauí (SEMEAR - PI, 2013)

Parque Eólico	Quantidade de Turbinas	Modelo das Turbinas	Potência Total
Ventos de Santa Joana IX	16	GE 1.85-82.5	29,6 MW
Ventos de Santa Joana X			
Ventos de Santa Joana XI			
Ventos de Santa Joana XIII			

Ventos de Santa Joana XII	17	GE 1.7-100	28,9 MW
Ventos de Santa Joana XV			
Ventos de Santa Joana XVI			
Ventos de Santa Joana II	15	Gamesa G97 Class 2A	30 MW
Ventos de Santa Joana VI			
Ventos de Santa Joana VIII			
Ventos de Santa Joana XIV			
Ventos de Santo Onofre I			
Ventos de Santo Onofre II			
Ventos de Santo Onofre III			

### 3.2 Complexo Eólico Chapada do Piauí II

O Complexo Chapada do Piauí II, cuja capacidade de geração será de 231,6 MW, possui características semelhantes ao Complexo Chapada do Piauí. Este complexo possui os mesmos tipos de turbinas eólicas, as GE 1.7-100 de potência unitária igual a 1,7 MW e as GE 1.85-82.5 de potência unitária de 1,85 MW, com torres de 80 metros de altura e potência de aproximadamente 30 MW por parque eólico, como pode ser observado na Tabela 3, obtida por meio do Relatório de Impacto Ambiental do Complexo Eólico Chapada do Piauí II.

Tabela 3 - Parques do Complexo Eólico Chapada do Piauí II  
(SEMEAR - PI, 2014)

Parque Eólico	Quantidade de Turbinas	Modelo das Turbinas	Potência Total
Ventos de Santa Joana IV	16	GE 1.7-100	29,6 MW
Ventos de Santa Joana I	17	GE 1.7-100	28,9 MW
Ventos de Santa Joana V			
Ventos de Santa Joana VII			
Ventos de Santo Augusto IV			
Ventos de Santa Joana III	16	GE 1.85-82.5	30 MW
Ventos de Santo Augusto III			
Ventos de Santo Augusto V			

Este complexo possuirá uma subestação, a SE Chapada III, que se conectará ao SIN por meio de uma linha de transmissão de 230 kV que irá da SE Chapada III para a SE Seccionadora, como pode ser visto na Figura 2.

### 3.3 Complexo Eólico Caldeirão do Piauí

O Complexo Eólico Caldeirão do Piauí possui capacidade de geração instalada de 415,8 MW. É composto por 15 parques eólicos, cada um com capacidade de geração instalada de 29,7 MW. Estes que, por sua vez, são compostos por 11 turbinas eólicas de 2,7 MW do modelo ECO 122, produzido pela Alstom, instaladas em torres de 80 metros de

altura, como pode ser visto na Tabela 4, contida no Relatório de Impacto Ambiental do Complexo Eólico Caldeirão do Piauí. Ao contrário das turbinas utilizadas no Complexo Eólico Chapada do Piauí, as turbinas desse complexo possuem geradores com tensão de saída de 1.000 V, que é elevada para 34,5 kV de forma a escoar a energia produzida pelas turbinas por meio de um sistema coletor de 34,5 kV que se conecta a uma subestação elevadora de 34,5/230 kV que se conectará ao SIN por meio da LT SE Caldeirão/ SE Seccionadora de 230 kV, a qual deverá ser futuramente substituída por uma LT de 500 kV.

Tabela 4 - Parques do Complexo Eólico Caldeirão do Piauí (SEMEAR - PI, 2012)

Parque Eólico	Quantidade de Turbinas	Modelo das Turbinas	Potência Total
Ventos de Santa Angelina	17	Alstom ECO 122	29,7 MW
Ventos de Santa Bárbara			
Ventos de Santa Edwirges			
Ventos de Santa Fátima			
Ventos de Santa Regina			
Ventos de Santo Adriano			
Ventos de Santo Albano			
Ventos de Santo Amaro			
Ventos de Santo Anastácio			

Ventos de São Basílio	17	Alstom ECO 122	29,7 MW
Ventos de São Felix			
Ventos de São Moisés			
Ventos de Santa Veridiana			
Ventos de Santa Verônica			

#### 4. SIMULAÇÃO DOS COMPLEXOS EÓLICOS

De forma a se estudar o comportamento individual de cada um dos novos complexos eólicos foram realizadas simulações computacionais utilizando-se o Matlab® e o seu modelo de usina eólica que pode ser visto por meio do comando *power\_wind\_dfig*. O modelo de usina eólica fornecida pelo comando *power\_wind\_dfig* é mostrada na Figura 3.

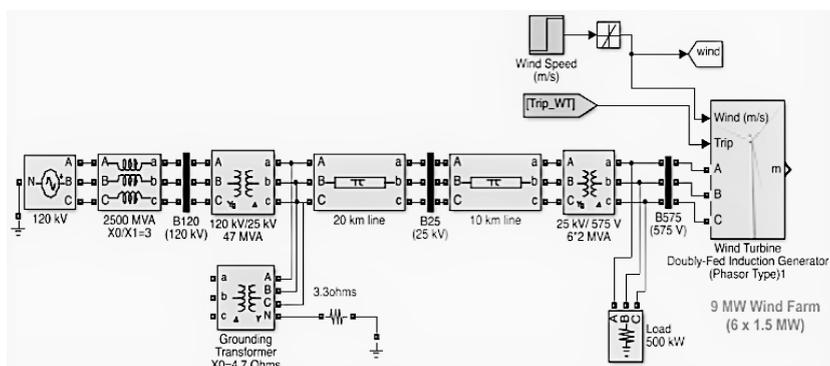


Figura 3 - Modelo de usina eólica utilizando turbinas com geradores indutivos duplamente alimentados.

O modelo apresentado, na Figura 3, representa uma usina eólica de 9 MW, composta por seis aerogeradores de 1,5 MW, conectada à rede por meio de LT de 25 kV e de uma LT de 120 kV. Possui cargas resistivas e motores conectados a um barramento de 25 kV, havendo a simulação de uma falta no barramento de 25 kV. Na simulação, utilizando o programa Matlab®, o vento é representado em forma de rampa como pode ser visto na Figura 4.

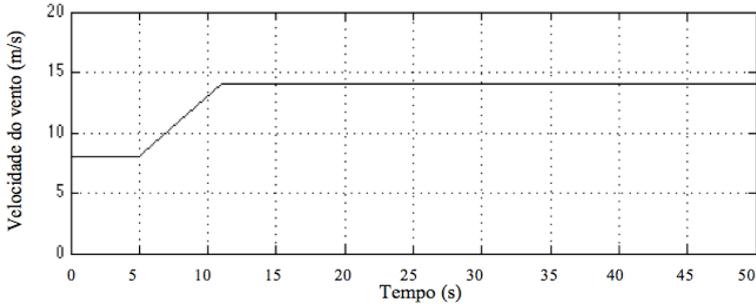


Figura 4 - Velocidade do vento durante simulação.

A simulação utiliza um sistema de controle de passo como forma de se controlar a velocidade rotacional das pás da turbina. A Figura 5, também criada a partir de simulações, mostra a variação em graus do eixo das pás durante a simulação e o resultado do controle da velocidade rotacional das pás.

Devido a diferenças entre os parâmetros da simulação e os padrões de nível de tensão adotados no Brasil, o modelo preexistente da simulação teve que ser alterado de modo a se assemelhar ao sistema de transmissão de energia que conecta as centrais eólicas ao SIN e também de forma a possuir a mesma capacidade de geração instalada dos complexos.

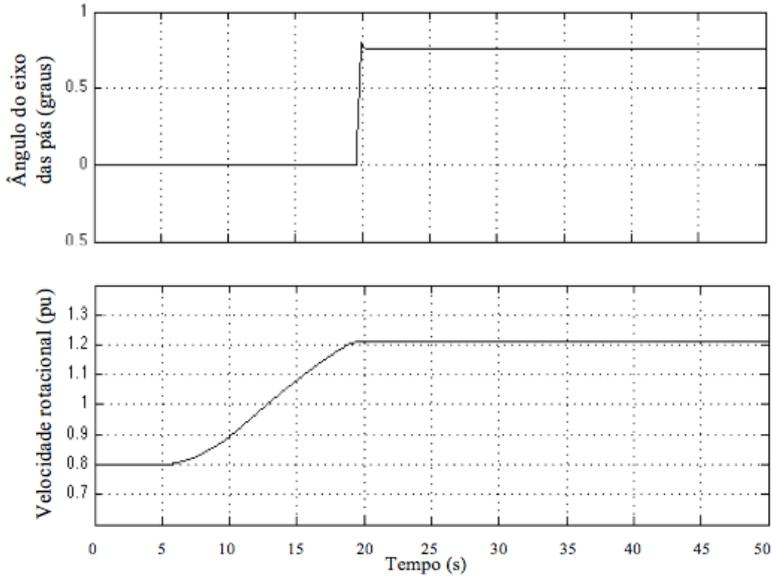


Figura 5 - Atuação do controle de passo e mudança da velocidade rotacional das pás da turbina devido ao aumento da velocidade de incidência do vento nas pás.

#### 4.1 Complexo Eólico Chapada do Piauí

Sabendo-se que os sete primeiros parques da Tabela II são conectados a SE Chapada I por meio da mesma LT implementou-se a simulação da conexão desses parques ao SIN, como pode ser visto na Figura 6.

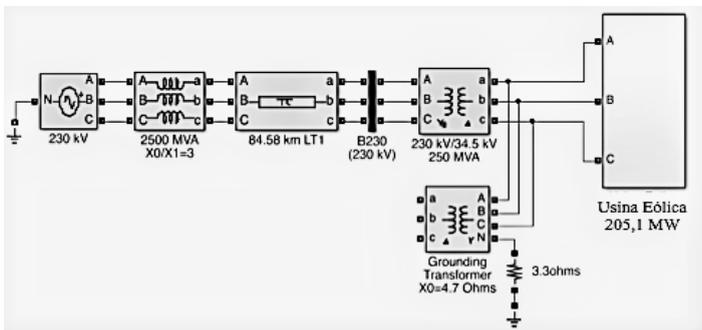


Figura 6 - Conexão de sete dos parques eólicos que compõem o Complexo Eólico Chapada do Piauí e que juntos totalizam 205,1 MW à rede através de uma LT 230 kV.

A simulação no Matlab® da parte do complexo eólico Chapada do Piauí que será conectado ao SIN por meio da LT de 230 kV, considerando o cenário de produção máxima e ativando-se o controle de reativo oferecido pelo modelo, obteve-se os dados expostos nos gráficos da Figura 7.

Com base na Figura 7(a) e 7(b), pode-se observar que com o aumento da velocidade rotacional das pás há o aumento da produção de potência ativa. Observando-se a Figura 7(d), nota-se que inicialmente a tensão de saída que era zero passa a se aproximar do seu valor nominal, possuindo algumas variações devido ao controle de potência reativa. Através da Figura 7(c) percebe-se que o complexo, inicialmente, consome reativo da rede, mas que após um pequeno intervalo de tempo o sistema de controle de reativo consegue controlar esse consumo. Note que ao alcançar o ponto de estol, há um aumento abrupto da quantidade de potência ativa gerada e um aumento no consumo de potência reativa, os quais são estabilizados logo após o ponto de estol. Confirmando, assim, que o consumo de potência reativa é aumentado abruptamente quando a potência de saída ultrapassa seu valor nominal (BURTON et al., 2001).

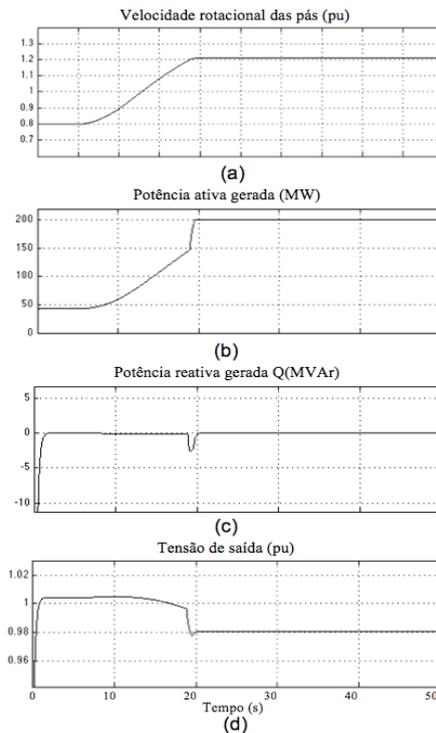


Figura 7- Gráficos obtidos a partir da simulação do Complexo Eólico Chapada do Piauí, parte 1.



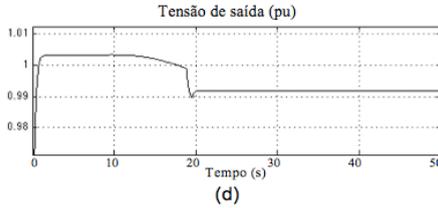
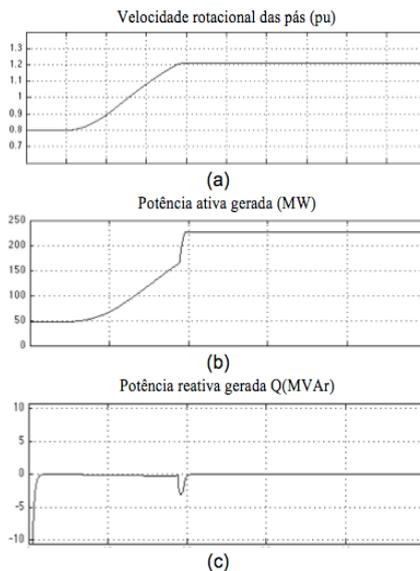


Figura 9 - Gráficos obtidos a partir da simulação do Complexo Eólico Chapada do Piauí, parte 2.

Os dados obtidos na simulação condizem com os encontrados na simulação da primeira parte do complexo eólico e servem para confirmar o comportamento do complexo eólico.

#### 4.2 Complexo Eólico Chapada do Piauí II

A simulação desse complexo foi realizada de forma similar a simulação contida na Figura 6 e apresentou os resultados exibidos nos gráficos da Figura 10. Esses resultados são similares aos obtidos na simulação das partes do Complexo Eólico Chapada do Piauí devido à proximidade de seus valores de capacidade instalada de geração.



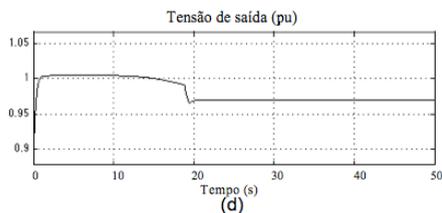
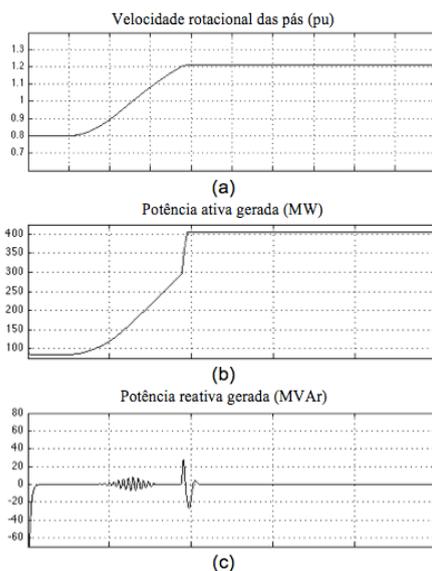


Figura 10 - Gráficos obtidos a partir da simulação do Complexo Eólico Chapada do Piauí II.

### 4.3 Complexo Eólico Caldeirão do Piauí

O Complexo Eólico Caldeirão do Piauí é constituído por 14 parques eólicos que totalizam 415,8 MW de capacidade instalada de geração. Esses parques serão conectados de forma individual a SE Caldeirão e depois terão sua produção escoada por meio da LT que conecta a SE do complexo à SE seccionadora. Os resultados da simulação desse complexo são mostrados na Figura 11.

Como pode ser visto na Figura 11 a potência ativa se comporta conforme esperado, pois a mesma aumenta conforme há o aumento da velocidade rotacional das pás.



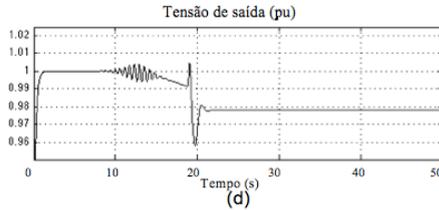


Figura 11- Gráficos obtidos a partir da simulação do Complexo Eólico Caldeirão do Piauí.

Nota-se, no gráfico da potência reativa gerada, que esta apresenta uma oscilação no intervalo que vai de 8 a 16 segundos que não pode ser percebida nos resultados apresentados nas Figuras 7, 9 e 10. Porém, por meio de simulações adicionais, notou-se que essa oscilação aumenta de acordo com o aumento da capacidade instalada de geração do complexo eólico. Esta oscilação é bem mais visível na simulação deste complexo porque a potência produzida é escoada por uma única LT, que é aproximadamente o dobro da potência escoada pelas LT dos outros complexos.

A tensão de saída também apresenta um período oscilatório que vai de 8 a 16 segundos maiores que o apresentado nas outras simulações, e o mesmo amplia-se de acordo com o aumento da capacidade instalada de geração do complexo.

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados dados sobre a configuração dos complexos eólicos que serão integrados ao SEP do Piauí bem como detalhes sobre as conexões a serem adotadas.

Os resultados obtidos por meio das simulações mostram que as centrais eólicas serão capazes de operar individualmente de forma estável durante o regime permanente, controlando seu consumo de potência reativa, garantindo, assim, a estabilidade tensão a nível de turbina. Porém, como as mesmas não poderão operar individualmente, faz-se necessário o desenvolvimento de outras simulações computacionais mais próximas do cenário real, de modo a se obter resultados da interação simultânea de todos os complexos com o SIN.

E o fato de que os maiores desafios envolvendo a integração de centrais eólicas estão relacionados a sua controlabilidade durante transientes, também se cria a necessidade de se realizar mais estudos sobre a integração dos novos complexos eólicos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMANN, T. Wind Power in Power Systems. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, 2005.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL . Capacidade de geração. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em 23/03/2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Capacidade de Geração no Estado. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/ResumoEstadual/CapacidadeEstado.cfm?cmbEstados=PI:-PIAU%CD>. Acesso em 23/03/2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 391/2009. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2009391.pdf>. Acesso em 23/03/2018.

BRASIL. CASA CIVIL. SUBCHEFIA DE ASSUNTOS JURÍDICOS. DECRETO N° 5025/2004. Disponível em [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2004/decreto/d5025.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5025.htm). Acesso em 23/03/2018.

BURTON, T. et al. Wind Energy Handbook. Chichester: John Wiley & Sons, 2001.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 462/2014. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=703>. Acesso em 23/03/2018.

CUSTÓDIO, Ronaldo dos Santos. Energia eólica para produção de energia elétrica. 1. ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009.

ELETROBRÁS. Evolução Histórica. Disponível em <http://www.eleto-braspiui.com/historico.php>. Acesso em 18/06/2016.

FALANI, Samira Y. A. et al. Prospecção Tecnológica para a Geração Eólica. Brazil Windpower 2015 Conference and Exhibition. Rio de Janeiro, 2015.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL - GWEC. Global Statistics. Disponível em <http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>. Acesso em 29/03/2015.

GOMES, P. et al. Uma visão geral sobre as questões relacionadas com a integração e operação de usinas de energia eólica no sistema elétrico interligado nacional – SIN, Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE, Curitiba – PR, 2017.

HEIER, S. Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion Systems. John Wiley & Sons, Ltd, 2014.

KHALIGH, A.; OMER, C.O. Energy Harvesting: Solar, Wind, and Ocean Energy Conversion Systems, Boca Raton: CRC, 2010.

MATTOS, L. P. et al. Uma visão do estado da arte da geração de energia elétrica offshore. CONEM 2010. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Campina Grande, 2010.

MOHOD, S.W.; AWARE, M.V., Power Quality and Grid Code Issues in Wind Energy Conversion System, in An Update on Power Quality, 2013.

MORELLI, Francis de Souza. Panorama geral da energia eólica no Brasil. USP. São Carlos, 2012.

PINTO, Milton de Oliveira. Fundamentos de energia eólica. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

RODRIGUES, Joselina Lima Pereira. Estudos Regionais do Piauí. 2ª ed. Teresina: Halley S/A – Gráfica e Editora, 2001.

SECRETARIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS - PI, “Relatório de Impacto Ambiental – Complexo Eólico Chapada do Piauí”, 2013.

SECRETARIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS - PI, “Relatório de Impacto Ambiental – Complexo Eólico Chapada do Piauí II”, 2014.

SECRETARIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS - PI, “Relatório de Impacto Ambiental – Complexo Eólico Caldeirão Grande”, 2012.

SILVA, Neilton F. Energias Renováveis na expansão do setor elétrico brasileiro: o caso da energia eólica. Rio de Janeiro: Synergia, 2015.

SINTRA, Hélder L. Modelação de torre eólica: controlo e desempenho. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa, 2013.

