

MODELAGEM DE UMA TURBINA EÓLICA UTILIZANDO REDES DE PETRI PARA O CONTROLE DE PARQUES EÓLICOS

¹BRUNO FERNANDES DOS SANTOS

¹DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA, UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA, JOÃO PESSOA, BRASIL
CIDADE UNIVERSITÁRIA – JOÃO PESSOA – PB – BRASIL
E-MAILS: BRUNO.SANTOS@CEAR.UFPB.BR

²JUAN M. MAURICIO VILLANUEVA, ³MAXWELL M. COSTA

²Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, Brasil
³Coordenação da Área de Indústria, IFTO, Palmas/Brasil AE 310 Sul, Av. LO 05, s/n, Plano diretor Sul,
Palmas-TO, CEP: 77.021-090
E-mails: ²jmauricio@cear.ufpb.com, ³maxwell@ifto.edu.br

Abstract— This paper has as objective develop a basic model of a wind turbine taking in account the parameters of pitch angle, transformer's output voltage and electric current intensity in the induction generator. This model was based on Petri's Nets modeling language. The main objective of the proposed model is stimulate the use of this language on the wind turbines projects, emphasizing its natural proprieties of its logic, that are converted in benefits to the designer in general. Simulation using a mathematical analysis of Petri Nets were done to reinforce the effectiveness of this proposition to wind turbines, where were defined the more important events which can cause changes in electric energy production, allowing results that agrees with the requirements of a smart and automatic system model.

Keywords— Wind turbines, Petri Nets, modelling of discrete events systems.

Resumo— Neste artigo, tem-se como objetivo desenvolver um modelo básico de uma turbina eólica considerando os parâmetros de ângulo de passo, tensão na saída do transformador e intensidade de corrente elétrica no gerador de indução. Este modelo foi baseado na linguagem de modelagem de Redes de Petri. O objetivo principal do modelo proposto é estimular a utilização desta linguagem na fase de projeto de turbinas eólicas, ressaltando suas propriedades naturais de sua lógica que são convertidas em benefícios para o projetista em geral. Simulações utilizando a análise matricial das redes de Petri foram realizadas para reforçar a efetividade desta proposição para turbinas eólicas, onde foram definidos os principais eventos que podem causar mudanças na produção de energia elétrica e, por conseguinte, os estados que determinados parâmetros assumiriam em resposta à tais variações, obtendo resultados que condizem com os requisitos necessários para um sistema automático inteligente.

Palavras-chave— Turbinas eólicas, redes de Petri, modelagem de sistema a eventos discreto.

1 Introdução

A energia eólica vem sendo uma das fontes de energias limpas e renováveis mais amplamente estudadas por pesquisadores de todo mundo. Sua utilização no Brasil ainda está em fase de crescimento e aceitação, entretanto, nas regiões norte, nordeste e sul, seu estágio já está mais avançado. Em 2009 iniciou-se um grande investimento no potencial eólico do Brasil, no qual mais de 40 bilhões de reais estão sendo destinados ao desenvolvimento da energia eólica no país, com plano de término para 2020. Vale destacar também que o Brasil possui um potencial eólico, cerca de 143 GW, com sua maior parte concentrada na Bahia, Ceará e Rio Grande do Sul (EBC, 2012).

O processo de obtenção de energia elétrica através da energia mecânica dos ventos já esta bem padronizado nas diferentes partes do mundo, diferindo apenas nas etapas de distribuição desta energia elétrica gerada para a rede do parque eólico. As pás de uma turbina eólica são responsáveis pela captação da energia mecânica dos ventos, onde esta é transformada em energia elétrica através da indução magnética, sendo transferida para a rede elétrica do parque.

Diante desse cenário energético, faz-se necessário o estudo das formas de modelagem de turbinas eólicas, com o desejo de torná-las eficazes na geração de energia elétrica. A ocorrência de falhas em turbinas eólicas pode ser bastante comum devido ao ambiente com comportamento estocástico em que elas se encontram, os parques eólicos. Além disso, as correções dessas falhas podem ser um dos fatores que mais contribuem para o alto custo de um parque eólico (ZHANG, Z.; VERMA, V.; KUSIAK, A. 2012).

Uma possível solução é projetá-las de tal forma que possam, através de informações obtidas por sensores convenientemente posicionados, detectar alterações em seus principais aspectos. A utilização da linguagem de modelagem conhecida como Redes de Petri mostrou-se uma potencial solução para esta situação, pois, devido às suas propriedades, estas apresentam a capacidade de auto-avaliação e auto-correção. Entretanto, em aspectos mecânicos, como vibrações tensionais causadas por bruscas variações na velocidade do vento, aumento substancial na temperatura da caixa de engrenagens, este pode não ser o melhor caminho para modelar essa parte do sistema, pois estes apresentam alta dependência do tempo, o que dificulta a abordagem com Redes de Petri.

Com a finalidade de descrever o funcionamento de turbinas eólicas, neste artigo, tem-se como objetivo desenvolver a modelagem de turbinas eólicas baseadas nas Redes de Petri que permita identificar alterações nos parâmetros fundamentais na operação de uma turbina eólica. Para este propósito, serão apresentadas a análise de estados e eventos relacionados à operação de uma turbina eólica, análise funcional do modelo e o comportamento discreto da turbina eólica, com futuras relações com parques eólicos em seu pleno funcionamento.

2 Definições Preliminares: Turbinas Eólicas e Linguagens de Modelagem

Nesta seção visa-se a delimitação da abrangência do tema proposto, de forma que seja possível definir de uma forma didática as variáveis trabalhadas em tal artigo, representando o comportamento funcional dos componentes da turbina através de variações nos valores apresentados por estes parâmetros. Em complemento à isto, deseja-se também informar algumas linguagens utilizadas na modelagem de uma turbina, e justificar a adoção à redes de Petri.

2.1 Descrição dos parâmetros fundamentais de uma turbina eólica

As turbinas eólicas representam a parte mais importante da geração de energia elétrica a partir da energia cinética do vento, por isso, seu comportamento às mais diversas condições do ambiente em que se encontra deve ser profundamente estudado. Em um ambiente estocástico como um parque eólico, diversos fatores podem representar anomalias para a turbina eólica. Por isso, tais variáveis devem ser especificadas e definidas na etapa de modelagem de um projeto de turbina eólica. Neste artigo, procurou-se estudar principalmente as seguintes variáveis: Corrente no sistema elétrico da turbina (i); Tensão do transformador (V); Ângulo de passo da turbina eólica, ou seja, o ângulo de ataque das pás em relação ao vento (θ) (SLOOTWEG, J.; POLINDER, H. 2001); Impedância equivalente no sistema elétrico (Z); Velocidade do vento (ϑ). Na Figura 2.1, se ilustram os componentes de uma turbina eólica governados pelas variáveis descritas anteriormente.

Estas variáveis foram escolhidas como referência para a modelagem que será executada, pois, estas mesmas são responsáveis por grande parte do comportamento de uma turbina eólica, sendo de fundamental importância para o bom funcionamento da turbina. Assim, no projeto das turbinas eólicas, um dos requerimentos é que estas variáveis sejam bem controladas, com a ausência de valores que não tenham sido previstos na fase de modelagem.

O ângulo entre as pás do rotor foi escolhido para estudo devido à sua influência na eficiência (C_p) de uma turbina eólica, pois, como é afirmado por diversos autores em artigos científicos, que, para uma

certa velocidade do vento ϑ , acima da velocidade nominal (ϑ_{nom}), existe um valor específico para o ângulo θ tal que C_p é máxima, ou seja, o ângulo de passo das pás está diretamente relacionado com a eficiência de uma turbina eólica (LEI, Yazhou; MULLANE, A.; LIGHTBODY, G.; YACAMI, R. 2006).

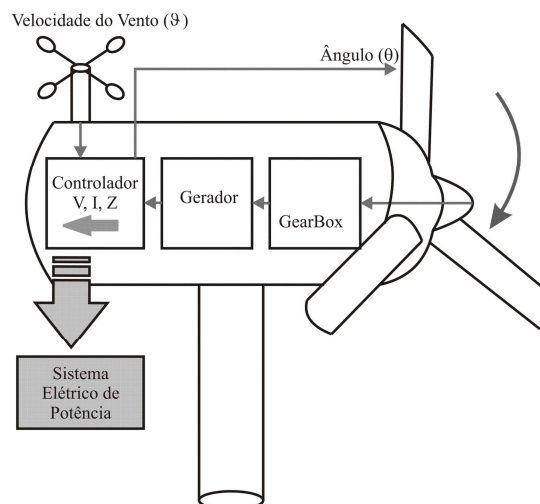


Figura 2.1. Diagrama de bloco de uma turbina eólica relativo às variáveis de interesse.

Existem outras influências causadas pelo ângulo de passo em conjunto com a velocidade do vento ϑ , mas estas são de caráter puramente mecânico, como vibrações na torre e torques indesejados, e, como já foi justificado, tal domínio físico não será trabalhado com redes de Petri.

Para a intensidade da corrente elétrica (i) do sistema elétrico e a tensão do transformador (V) existe uma relação básica, dada pela Lei de Ohm:

$$V = Z \times i \quad (1)$$

Por isso, a modelagem da variável corrente, deve estar em sincronia com as características da tensão para as mesmas situações em que ambas são submetidas. Estas duas, por sua vez, também exercem grande influência no funcionamento de uma turbina eólica devido ao seu caráter fundamental presente em qualquer sistema elétrico, além de serem determinantes na produção de energia.

A impedância (Z) é um parâmetro que permite controlar os valores da corrente e da tensão, devido à relação que estas possuem pela equação (1).

Em relação à variável da velocidade do vento (ϑ), por esta apresentar um comportamento completamente estocástico, torna-se inviável executar seu controle através de parâmetros presentes na turbina. Entretanto, devido à sua estreita relação com o ângulo de passo, é possível obter diversas respostas às diversas variações em sua velocidade através do controle do ângulo já mencionado.

Na Figura 2.1, ilustra-se o papel do controlador no comediamento da turbina através do controle das

variáveis V , Z e i , em que, através de sensores posicionados em partes desejáveis da turbina, como anemômetros e afins, este é atualizado, através de softwares do tipo *SCADA*, com valores para tais variáveis, realizando as devidas alterações para cada condição (NARAYANA, M.; PUTRUS, G.; JOVANOVIĆ, M. 2009).

2.2 Linguagens e técnicas para projetos de turbinas eólicas

As variáveis escolhidas neste artigo para analisar o comportamento funcional de uma turbina eólica podem ser consideradas como *discretas*, na qual é de relevância conhecer apenas sua influência para determinados estados discretos, a influência do tempo nesses casos é mínima. Dado esta condição primordial, é válido afirmar que pode ser aplicada os conceitos e princípios da Teoria de Eventos Discretos, e, a partir daí, uma considerável quantidade de imposições, propriedades e restrições irão surgir.

Existem diversas linguagens que são úteis para avaliar e projetar sistemas à eventos discretos, uma delas é a Automata, que não foi utilizada neste artigo pois apresenta características de não-determinismo que não são desejáveis para a nossa situação. Um outro tipo de técnica que vem sendo aplicada com essas finalidades, são as Redes Neurais Dinâmicas (NARAYANA, M.; PUTRUS, G.; JOVANOVIĆ, M. 2009), que são capazes de realizar certas previsões para valores das variáveis mencionadas. Entretanto, redes neurais apresentam alta dependência do seu estado anterior, o que não é interessante para a configuração deste artigo.

A linguagem adotada por este artigo para modelar o comportamento básico de uma turbina eólica, foi a linguagem de redes de Petri (RdP), que foram originalmente apresentadas por Carl Adam Petri no ano de 1960. Estas redes de Petri possuem propriedades únicas que são interessantes para o nosso contexto da turbina eólica. Várias exigências e utilidades requisitadas na modelagem de turbinas eólicas e as respectivas propriedades das RdP que as conferem foram listadas na Tabela 2.1. É verificável através da análise desta tabela que esta linguagem capacita o sistema de executar atividades próprias de sistemas inteligentes, além de possuir certa independência do tempo, tornando desnecessário o uso de probabilidades e incertezas no projeto deste.

Por estes motivos, a linguagem de modelagem conhecida como Redes de Petri (RdP) foi escolhida para modelar uma turbina eólica, em relação as variáveis já apresentadas, fazendo sempre a consideração que estas são discretas, ou seja, possuem independência do tempo e suas mudanças podem ser interpretadas como causadas por eventos que alteram os estados do sistema.

A capacidade de se visualizar o modelo em Redes de Petri de forma gráfica, quando esta está na sua forma de grafo, facilita o entendimento do comportamento do sistema, devido à fluidez em que estas

possuem na sua forma visual. O formalismo matemático associado às redes de Petri tem seu nível de precisão, mas ainda precisa ser desenvolvido por parte dos pesquisadores. A matemática dos sistemas à eventos discretos ainda não foi bem concretizada, o que traz certas limitações para suas aplicações.

Tabela 2.1 - Propriedades de Redes de Petri.

Utilidades para modelagem de uma turbina eólica	Propriedades de Redes de Petri
Capacidade de analisar situações e tomar decisões	Conflitos
Capacidade de realizar tarefas simultâneas	Paralelismo
Capacidade de retornar ao estado inicial após um evento	Reversibilidade
Possibilidade de análise estrutural	Forma gráfica
Existência de metodologia para desenvolvimento	Análise Matricial
Tempo de funcionamento	Sequenciamento

Uma outra limitação que encontramos, além da matemática, foi a incapacidade de estudar um dos componentes mais importantes de uma turbina eólica com a teoria de sistemas à eventos discretos, a *gearbox*. A "*gearbox*", ou caixa de engrenagens, como mostra a Figura 2.1, é responsável pela conexão entre a parte mecânica da turbina, o rotor, e a parte elétrica desta, o gerador. Existe um acoplamento mecânico, realizados por eixos e engrenagens presentes na *gearbox*, que traz diversas vibrações tensionais para a turbina, o que pode causar diversas falhas na turbina (ZHANG, Z.; VERMA, A.; KUSIAK, A. 2012).

De acordo com dados fornecidos por pesquisadores e projetistas, a *gearbox* é o componente de mais alto custo de manutenção da turbina eólica, seu custo chega a 20% do total da turbina, pois, devido à essa interligação entre um sistema mecânico com um elétrico, esta é a maior fonte de defeitos da turbina eólica, e precisa ser monitorada constantemente por sensores (GARCIA, M.; SANZ-BOBI, M.; DEL PICO, J. 2006). Além disso, seu comportamento funcional não pode ser analisado discretamente, pois as variáveis que são englobadas pela *gearbox*, como temperatura nos eixos, são todas de caráter contínuo.

3 Modelagem do comportamento das variáveis fundamentais utilizando redes de Petri

A fase de modelagem de uma turbina eólica é uma das primeiras etapas no planejamento de qualquer parque eólico. É nesta etapa do projeto em que define-se como a turbina funcionará em resposta ao ambiente em que ela se encontra, definindo quais variáveis são mais influentes em seu comportamento, e quais podem vir a ocasionar situações indesejáveis para uma empresa. Então, diante deste cenário, deve-se executar esta etapa com muita cautela, estruturando metodologias de trabalho e realizando simulações sempre que possível. Estas simulações são essenciais para gerar segurança na fase de execução do projeto,

por estas fornecerem resultados mesmo ainda na fase de modelagem.

3.1 Análise do comportamento das variáveis

Como estamos adotando variáveis discretas, inicialmente serão definidos os valores que tais variáveis podem assumir em condições normais e adversas. Para a velocidade do vento, segundo Clemens&Syed, 2006, o comportamento para o ângulo das pás possui, basicamente, duas etapas: Uma é para o caso em que a velocidade do vento está abaixo de um valor pré-determinado na fase de modelagem, que é a velocidade nominal do vento, a outra é quando a velocidade do vento assume valores acima deste parâmetro. A velocidade nominal do vento é o valor em que a estrutura da turbina eólica pode ser danificada pelo vento caso esta não retorne para valores dentro da faixa de segurança em poucos momentos. De acordo com os fabricantes de turbinas eólicas, como a Enercon, da Alemanha, o valor da velocidade nominal geralmente é de 24 m/s. Por isso, com o objetivo de obter a maior eficiência possível e proteger o sistema elétrico de potências elétricas excessivas, define-se o comportamento do ângulo de passo θ para valores da velocidade do vento acima e abaixo do valor nominal. Em um contexto em que a velocidade do vento está abaixo da velocidade nominal, o ângulo θ deve assumir seu valor padrão de 0° , pois é neste ângulo em que o aproveitamento da energia cinética do vento pela turbina é máximo e constante (Yazhou&Lightbody, 2006).

Na situação oposta, em que a velocidade do vento ultrapassou a velocidade nominal, é necessário a variação no ângulo θ a fim de proteger o sistema elétrico da turbina, reduzindo a potência gerada pela turbina. Quando isto acontece, o valor para θ aumenta proporcionalmente ao aumento da velocidade do vento, ou seja, quanto maior for a velocidade do vento, maior será θ . Este aumento no valor do ângulo irá aumentar o módulo do torque restaurador presente no eixo principal da turbina, que liga o rotor à *gearbox*, reduzindo assim a potência de saída, uma atitude necessária para proteger o sistema elétrico e a rede de distribuição do parque eólico. Traduzindo isto para a linguagem de RdP, o ângulo de passo ou ângulo das pás do rotor pode ser interpretado como uma posição da RdP, que por sua vez, representa um estado do sistema. A ocorrência do ultrapasse da velocidade do vento à velocidade nominal representaria um evento que em RdP é definido como uma transição.

Para casos de turbulência, em que a velocidade do vento varia bruscamente por um curto período de tempo, seria necessário adotar a estratégia de atraso temporal (*delay*) para o sistema, em que os anemômetros posicionados na turbina levariam uma certa quantidade de tempo para atualizar seus valores, ou seja, o controlador da turbina não iria alterar o valor de θ com uma frequência excessiva, podendo danificar o rotor.

Para as características elétricas fundamentais do sistema elétrico da turbina eólica, temos que estas também podem ser tomadas como discretas e deve-

mos definir os valores que estas podem assumir em resposta às ocorrências de determinados eventos, como uma potência de entrada alta causada por um repentino aumento na velocidade do vento. Nos parágrafos anteriores, foi definido o comportamento ideal do ângulo θ para possíveis configurações da velocidade do vento. Entretanto, a alteração do valor de θ não é instantânea, ela leva um determinado tempo para ocorrer, onde este é definido pelos fabricantes. Porém, a resposta da corrente elétrica à essas variações na velocidade do vento são praticamente instantâneas, e estes breves picos de corrente podem ser prejudiciais para o bom funcionamento da turbina eólica. Por isso, os comportamentos da corrente elétrica, tensão e ângulo de passo devem ser avaliados em conjuntos e representados por uma mesma rede de Petri, dada esta configuração de concorrência, paralelismo, reunião e conflito. A corrente elétrica presente no sistema elétrico da turbina, que fica localizado após a *gearbox*, onde seus componentes principais são: o gerador, o transformador e os conversores de potência. As características elétricas da turbina possuem forte influência sobre estes componentes, essenciais na geração de energia elétrica. Dadas estas restrições, devemos então definir o comportamento destas duas variáveis, tensão e corrente, olhando-as como discretas e descrevendo suas respostas para determinados valores assumidos por estas.

Para a tensão no transformador, em um contexto de um clima ameno, sem tempestades e turbulências prolongadas, a tensão pode eventualmente cair por um curto período de tempo, ou permanecer em valores baixos por uma quantidade considerável de tempo. Na primeira situação, que seria causada por uma falha mais comum, o procedimento ideal seria o desligamento da turbina por um ou dois minutos, para evitar sobrecarregar os conversores de potência presentes na parte elétrica da turbina. Caso a tensão permaneça baixa por um tempo prolongado, será necessário a desativação dos conversores de potência até que a falha seja sanada (Yazhou&Lightbody, 2006). Para a variável da corrente elétrica, temos que esta pode assumir três possíveis valores discretos, são eles: baixa, normal e alta. O comportamento da corrente elétrica pode ser controlado através da impedância no sistema elétrico. É notável que o valor padrão para a corrente elétrica é o normal, pois é neste valor em que a eficiência da turbina eólica é máxima.

Para manter a intensidade da corrente em valores estáveis, deve-se aumentar ou reduzir a impedância no sistema elétrico. Caso a corrente assuma valores excessivos, o que pode ter sido causado, por exemplo, por um aumento na velocidade angular do rotor produzindo uma alta quantidade de energia elétrica, deve-se então aumentar a impedância para contrabalancear a corrente, reduzindo sua intensidade para valores normais. Para o caso oposto, em que a corrente está assumindo valores baixos, deve-se então reduzir a impedância para possibilitar um fluxo maior de carga no sistema.

Para resumir os estados e eventos apresentados, na Tabela 3.1 contêm as variáveis, o valor assumido por estas em uma determinada situação não especificada e seu comportamento ideal para tal situação.

Tabela 3.1 - Breve resumo das variáveis e seu comportamento.

Variável	Valores	Comportamento
Ângulo de passo (θ)	Abaixo de ϑ_{nom}	θ Padrão (0°)
	Acima de ϑ_{nom}	Aumentar θ
Intensidade de corrente elétrica (i)	Baixa	Reduzir Z
	Normal	Manter Z
	Alta	Aumentar Z
Tensão (V)	Breve queda	Desligar Turbina
	Longa queda	Desativar Conversores

4 Modelagem de uma Turbina Eólica considerando a Velocidade do Vento, Tensão e Corrente

Nesta última seção do presente artigo busca-se apresentar os resultados obtidos para a análise dos comportamentos das variáveis aqui estudadas. Foram abordados dois tipos de análises: matricial e do grafo do modelo. Nesta seção serão apresentadas as simulações usando o software *MATLAB*. Na Figura 4.1 ilustra-se o modelo proposto de uma turbina eólica baseada na teoria de redes de Petri.

4.1 Considerações tomadas para o ambiente de uma Turbina Eólica

Em um ambiente de parque eólico com condições ambientais normais, ou seja, sem tempestades ou quaisquer tipos de perturbações que afetem as turbinas eólicas, a turbina opera em modo normal, sem quaisquer anomalias em seu sistema. O ângulo das pás, em tal contexto, é o ângulo padrão, 0° , onde a eficiência da turbina é máxima para uma dada velocidade do vento (ϑ) menor que a velocidade do vento nominal (ϑ_{nom}). Em respeito ao sistema elétrica, os valores para a tensão de saída no transformador e da intensidade de corrente no gerador de indução são estáveis, sem picos. Nessa configuração de parâmetros, a turbina se mantém ligada, e os conversores de potência são mantidos ativos.

4.2 Modelagem da variável ângulo de passo

Um modelo consistente e eficiente deve também ter a capacidade de modelar situações adversas. Inicialmente, foi abordado o caso em que a velocidade do vento, por um breve instante, ultrapassa a velocidade nominal definida pelo projetista e/ou fabricante. Vale ressaltar que o comportamento ideal para o controlador do ângulo da turbina já foi apresentado na seção anterior na Tabela 3.1. Nesta etapa, o ângulo θ irá somente ser representado por redes de Petri através de uma determinada sequência de eventos.

Caso ϑ ultrapasse ϑ_{nom} , em primeiro lugar, T1 será disparada, indicando que houve uma condição

($\vartheta > \vartheta_{nom}$) em que alguma parte do sistema deve ser alterada, consequentemente, P1 recebe uma ficha proveniente de T1. Logo em seguida, o sistema terá de tomar uma decisão, devendo identificar em que parte do sistema encontra-se a falha, na parte elétrica ou na parte do rotor. Isso será realizado através de sensores, anemômetros, que irão detectar o aumento no valor da velocidade do vento (ϑ), indicando que o ângulo θ deve ser alterado, afim de reduzir a potência gerada, protegendo então o sistema elétrico. Logo após essa tomada de decisão, a ficha presente em P1 irá ser deslocada através do arco que liga está com T4, disparando tal transição, como esperado. Em sequência, P2 irá receber uma ficha, indicando que o ângulo θ deve ser elevado para reduzir a quantidade de energia gerada pela turbina. É importante verificar que P2 possui uma capacidade de 5 fichas. Isto é justificável, pois, caso ϑ assumia valores muito acima de ϑ_{nom} , será necessário aumentar o valor de θ progressivamente, ou seja, P2 receberá mais de uma ficha. Logo após ϑ ter retornado a valores abaixo de ϑ_{nom} , a transição T5 é disparada, levando o ângulo de passo para seu valor padrão de 0° . É necessário notar que, caso P2 possua 3 fichas, por exemplo, em casos de turbulência, T5 será disparada três vezes, não apenas uma. Depois dos disparos de T5, quando o ângulo das pás retornou ao seu valor padrão, apenas uma ficha irá para P10, indicando que o sistema voltou ao seu estado inicial, com uma ficha em P10. Agora que foi definido, através da linguagem de RdP, a sequência de disparos das transições que representa uma mudança na velocidade do vento, podemos então resumir esta sequência montando um vetor de eventos v_{eve1} , que será utilizado para simulação de tal ocorrência. Esta sequência é dada por:

$$T1 \rightarrow T2 \rightarrow T4 \rightarrow T5$$

Então, com esta sequência, podemos montar v_{eve1} que é $v_{eve1} = [1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$. Note que este vetor possui 18 colunas, onde cada coluna representa uma transição. Se uma determinada coluna possui seu elemento maior que zero, significa que tal transição foi disparada ao menos uma vez, no caso acima, as transições T1, T2, T4 e T5 foram disparadas uma única vez cada.

4.3 Modelagem das interações entre as variáveis do sistema elétrico

Em determinadas situações, mais de um parâmetro pode ser alterado, o que requisita a capacidade das RdP de modelar eventos simultâneos, esta característica é proveniente da aptidão desta linguagem com paralelismo e conflitos, conforme a Tabela 2.1. Uma ocasião que pode verificar estas duas propriedades é uma possível alteração no valor da corrente e da tensão, onde o modelo proposto (Fig. 4.1) é capaz de alterar a impedância de forma conveniente, controlando os valores da corrente e da tensão apropriadamente. Vamos repetir o processo adotado na seção anterior, só que de forma resumida.

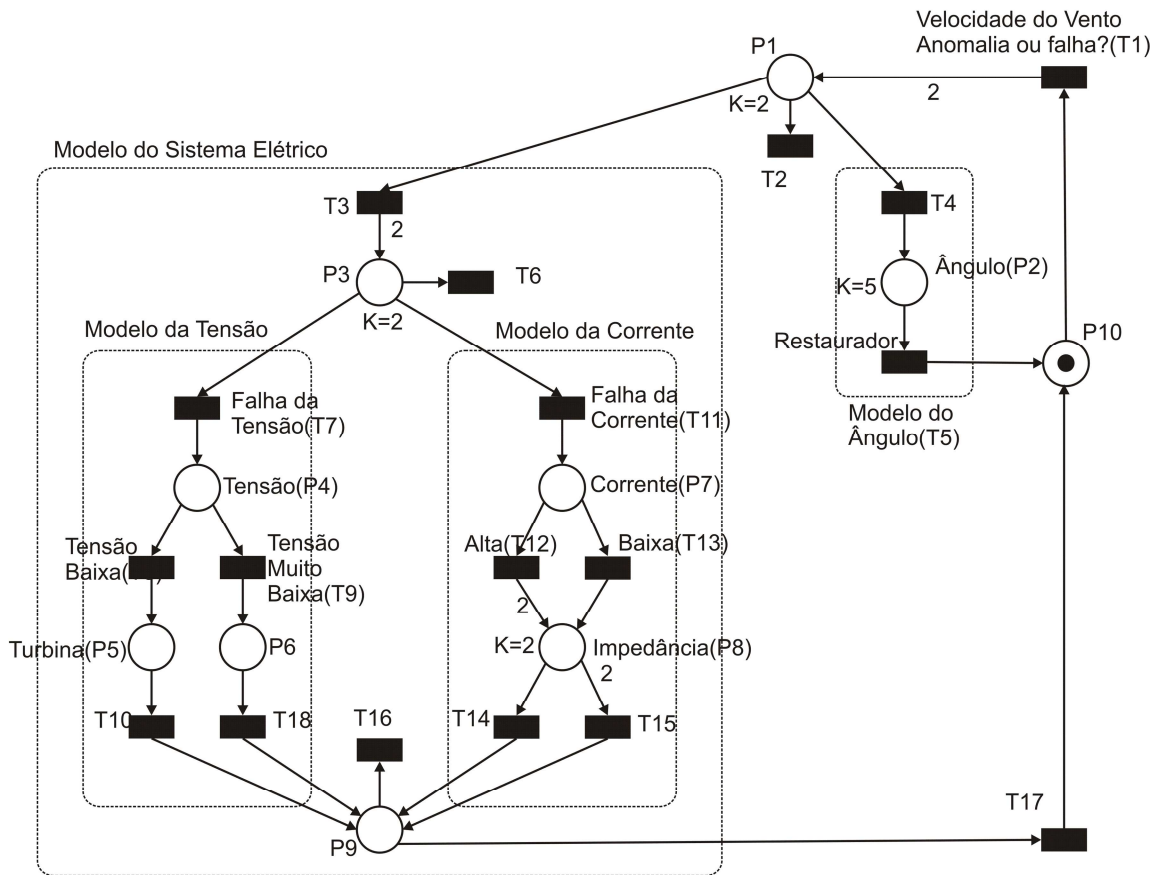
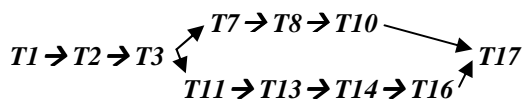


Figura 4.1 - Modelo da Turbina considerando as falhas no ângulo, tensão e corrente.

Neste contexto de variação nos parâmetros elétricos, tanto a tensão (V) como a corrente (i) são alteradas. Inicialmente $T1$ é disparada, fornecendo duas fichas para $P1$, em que uma será consumida pelo sorvedouro. A outra ficha irá seguir o fluxo no sentido esquerdo da Figura 4.1. Com isso, $T3$ é disparada levando duas fichas para $P3$. A partir daí, uma ficha dispara $T7$ (falha na tensão) e a outra ativa $T11$ (falha na corrente), cada uma seguindo seu fluxo definido pelo tipo de falha ocorrida, que, neste caso, estamos considerando que é uma falha causadora de uma queda no valor da tensão (V) e da intensidade de corrente (i). Logo após cada ficha ter completado seu caminho correspondente, estas duas irão para $P9$ e seguirão um fluxo padrão que irá levar a rede para seu estado inicial, com uma ficha em $P10$. A sequência de transições segue abaixo:



Através desta sequência seremos capazes de montar outro vetor de eventos, dado por:

$$v_{eve2} = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1].$$

5 Análise Matricial do Modelo de Turbina Eólica

Definidos os vetores de eventos, iremos fazer uso deles através de uma técnica muito adotada para analisar o funcionamento de redes de Petri, a Análise Matricial. A Análise Matricial de RdP consiste na avaliação dos resultados obtidos pela operação da RdP na sua forma matricial com os vetores de eventos. Através desta técnica, é possível prever qual o estado final para cada posição, ou seja, quantas fichas irão ocupar cada posição dados as quantidades de fichas iniciais e um vetor de eventos, ou uma sequência destes. Isto pode ser traduzido em forma na forma de equação de estado, dada por:

$$M_f = M_i + A'_{ixp} \times v'_{eve} \quad (3)$$

em que: M_f é o vetor coluna que representa a quantidade de fichas em cada posição ao final da operação, M_i é o vetor coluna que representa a quantidade de fichas em cada posição antes de a operação ser realizada e A'_{ixp} é a transposta da matriz característica da rede de Petri em questão. O cálculo dos coeficientes de A_{ixp} é realizado da seguinte forma:

$$a_{ij} = w_{i \rightarrow j} - w_{j \rightarrow i} \quad (4)$$

em que o coeficiente a_{ij} é o peso do arco de entrada da transição i para a posição j menos o peso do arco de saída da posição j para a posição i .

Com M_i definido como $[0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1]$, o estado inicial antes de qualquer evento, com o auxílio do *MATLAB*, iremos obter M_f . Para a situação em que a velocidade do vento ϑ ultrapassa ϑ_{nom} , temos, para M_f , utilizando a Eq.(3):

$$M_f = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1]$$

Observa-se que M_f é igual a M_i , reforçando a propriedade de auto-correção das redes de Petri, pois o sistema foi capaz de detectar o erro, corrigi-lo e retornar ao estado inicial. O mesmo se repete para os casos posteriores.

Para a mesma configuração, vamos verificar o gráfico que ilustra a sequência de *estados* assumidos pela posição P2, que representa o valor do ângulo de passo (θ), como pode ser ilustrado na Figura 4.2. Nesta figura, observa-se que quando a transição é disparada em $t = T4$, o ângulo assume o valor de 5° , reduzindo a eficiência C_p da turbina afim de proteger o sistema elétrico da mesma. Logo após $T4$, em $T5$, a velocidade do vento retorna a valores abaixo da velocidade nominal, possibilitando o retorno do ângulo padrão 0° , em que a eficiência é máxima.

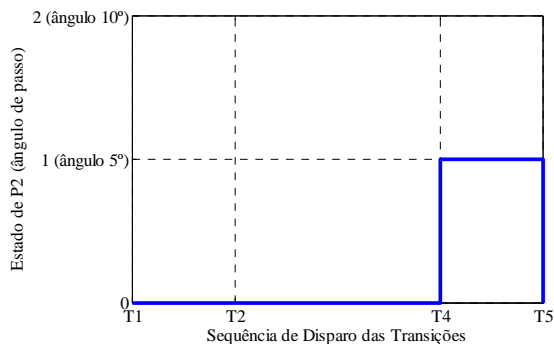


Figura 4.2 Estados do ângulo de passo (P2) durante um aumento da velocidade do vento, ϑ .

Para a segunda ocasião estudada, em que i e V assumem, simultaneamente, valores abaixo do normal, podem ser analisados as posições P5 e P8. Assim, para a análise comportamental da turbina em relação ao sistema elétrico, observa-se que quando a tensão (V) sofre uma queda em seu valor, em $t = T8$, P5 recebe uma ficha, indicando que a turbina será desativada por um breve período de tempo, afim de proteger os conversores de potência. Quando $t = T10$, o sistema indica que a V assumiu valores normais, podendo assim reativar a turbina, voltando assim ao seu estado inicial, como se ilustra na Figura 4.3.

Em seguida, foi analisada o estado da turbina em relação aos valores assumidos pela corrente (i), em que pode ser observada que, quando $t = T13$, P8 (Z) recebe uma ficha, ilustrando que a impedância deve ser reduzida para que seja possível a estabilização de i , que ocorre em $t = T14$, como se ilustra na Figura 4.4.

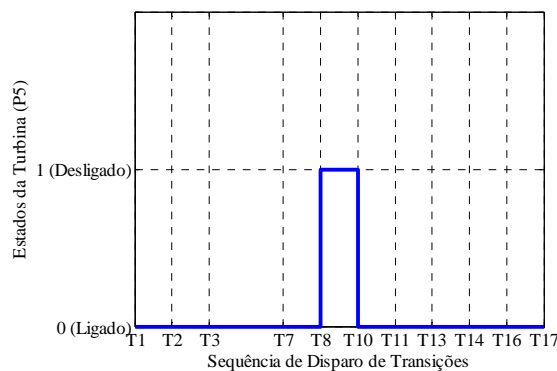


Figura 4.3 Estados de Turbina (P5) durante uma queda da Tensão, V .

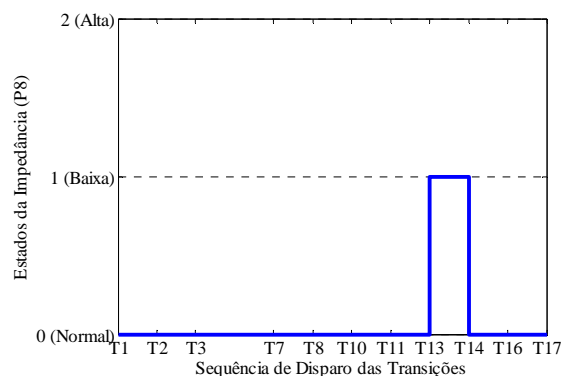


Figura 4.4 Estados da Impedância (P8) em um evento de queda de corrente, i .

Conclusões

O comportamento funcional de uma turbina eólica, foi avaliada através do grafo de uma rede de Petri, mostrando que a lógica deste linguagem é compatível com o modo em que os principais parâmetros estudados na fase de modelagem de uma turbina eólica são definidos.

A possibilidade de automatizar tais sistemas através da utilização desta linguagem na fase de projeto de qualquer turbina, fornece uma redução de custos na manutenção da turbina no que diz respeito aos parâmetros adotados, ângulo de passo, tensão de saída no transformador e intensidade de corrente no gerador de indução, pois, com as propriedades conferidas pelas redes de Petri, tais como auto avaliação e auto-correção, a necessidade de realizar-se uma manutenção programada periodicamente é reduzida ou eliminada, gerando lucro para a indústria de energia eólica, pois as turbinas irão gerar energia por mais tempo. Por fim, a viabilidade de utilizar-se redes de Petri para modelar as interações entre as turbinas eólicas-deverá ser verificada através de testes por computador, ou até mesmo com protótipos, em artigos futuros. Entretanto, a possibilidade de tal feito existe e é consistente, pois uma vez que tal método de modelagem capacita o sistema de lidar com situações de conflito, paralelismo e concorrência, que certamente aparecem em interações entre turbinas eólicas, sua execução certamente será efetivada.

Referências

- Cassandras, C.; Lafortune, S. (2008). *Introduction to Discrete Event Systems*. Springer LLC, second edition.
- Clemens J.; Syed M.; Poul Sørensen and Birgitte B. (2007). *Design of a wind turbine pitch angle controller for power system stabilisation*, Renewable Energy, vol. 32, pp. 2334-2349.
- EBC (2012).
<http://memoria.ebc.com.br/agenciabrasil/noticia/2012-08-29/investimentos-em-energia-eolica-devem-chegar-r-40-bilhoes-ate-2020>, acessado dia 04/03/2014, às 18:03 horas.
- Mari Cruz Garcia, Miguel A. Sanz-Bobian and Javier del Pico. (2006). *SIMAP: Intelligent System for Predictive Maintenance: Application to the health condition monitoring of a wind turbine gearbox*. Computers in Industry, vol. 57, issue 6.
- Narayana, M.; Putrus, G.; Jovanovic, M. and Pak Sing L. (2009). *Predictive control of wind turbines by considering wind speed forecasting techniques*. Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009 Proceedings of the 44th International, vol., no., pp.1,4.
- Slootweg, J.; Polinder, H. (2001). *Dynamic Modelling of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator*. Electrical Power Systems. IEEE.
- YazhouLei; Mullane, A.; Lightbody, G. and Yacamini, R. (2006). *Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies*. Energy Conversion, IEEE Transactions on. vol.21, no.1, pp.257,264.
- Zijun Zhang; Verma, A. and Kusiak, A. (2012). *Fault Analysis and Condition Monitoring of the Wind Turbine Gearbox*. Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol.27, no.2, pp.526,535.