

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELÉCTRÓNICA

HERRAMIENTA METODOLÓGICA DE LA DETERMINACIÓN DE LA
RESPUESTA OPERATIVA DEL GENERADOR EÓLICO RESPECTO
A SU CURVA DE CAPACIDAD EN EL PUNTO DE CONEXIÓN

DESARROLLAR UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN PARA
DETERMINAR LA RESPUESTA OPERATIVA DEL GENERADOR
EÓLICO RESPECTO A SU CURVA DE CAPACIDAD P/Q EN EL
PUNTO DE CONEXIÓN AL SISTEMA

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

MARCO ALEJANDRO MEDINA PICHUCHO

alejo_1998@live.com

DIRECTOR: PhD. JOSE ANTONIO OSCULLO LALA

jose.oscullo@epn.edu.ec

DMQ, Febrero 2024

CERTIFICACIONES

Yo, MARCO ALEJANDRO MEDINA PICHUCHO declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Sr. MARCO ALEJANDRO MEDINA PICHUCHO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por MARCO ALEJANDRO MEDINA PICHUCHO, bajo mi supervisión.

Dr. JOSÉ ANTONIO OSCULLO LALA
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el producto resultante del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

MARCO ALEJANDRO MEDINA PICHUCHO

PhD. JOSÉ ANTONIO OSCULLO LALA

DEDICATORIA

A mis abuelitos Raúl y Margarita

A mis padres Marco y Viviana

A mis hermanas Diana y Lucciana

A mi abuelito Rigoberto

Y a todo aquel que formó parte de este largo camino.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a mis abuelitos, Raúl y Margarita que siempre me brindaron su amor y apoyo incondicional para ser la persona que soy. A mi abuelito, quien es mi ejemplo de vida, infinitas gracias por todas las enseñanzas y cariño que siempre me brindó. Ahí donde quiera que te encuentres sé que siempre estás conmigo.

A mi madre que siempre me ha apoyado en el transcurso de este largo viaje lleno de altos y bajos, tu amor infinito me hizo sentir siempre respaldado para afrontar todos los retos. Gracias por siempre estar ahí para mí.

A mi padre que fue una inspiración y ejemplo de profesional para seguir esta carrera.

A mi hermana por su incondicional apoyo, fuiste un espejo en el que me pude reflejar para seguir por el camino correcto.

A mi querida nené que llegó a alegrarme la vida con sus locuras y amor.

A toda mi familia por hacerme sentir siempre querido.

A todos los amigos, profesores y personas que conocí en la universidad que fueron parte de mi crecimiento a través de todos estos años.

También quiero agradecer a mi tutor el Dr. José Oscullo quien fue fundamental en la guía y desarrollo de este trabajo. Una mención especial a esa persona que compartió conmigo durante la etapa final de la carrera, su compañía me motivo a seguir adelante.

Estoy seguro de que sin el apoyo de todos no habría sido posible todo esto. Gracias por todo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ENERGÍA EÓLICA	1
1.2 TIPOS DE AEROGENERADORES.....	3
1.3 CURVA PQ del AEROGENERADOR DFIG	5
1.4 CURVAS PQ EN CÓDIGOS DE RED.....	8
1.5 OBJETIVO GENERAL.....	9
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
1.7 ALCANCE	9
2 MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 MODELACIÓN AEROGENERADOR DFIG [14].....	10
2.2 LÍMITES DE LA CURVA DE CAPACIDAD DEL DFIG [9], [14], [27]... 12	
2.2.1 Límite de la corriente del rotor	12
2.2.2 Límite de voltaje del rotor.....	14
2.2.3 Límite de la corriente del estator.....	15
2.2.4 Límite de la potencia mecánica.....	16
2.2.5 Potencia total del aerogenerador DFIG	16
2.3 REQUERIMIENTOS DE LA CURVA PQ EN LOS CÓDIGOS DE RED [19], [29].....	17
2.3.1 Código de red alemán	17
2.3.2 Código de red español	18
3 METODOLOGÍA.....	18
3.1 PARAMETRIZACIÓN DE LA CURVA P/Q DEL AEROGENERADOR DFIG 20	
3.2 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE PRUEBA	20
3.2.1 Selección de la barra de inclusión de la central eólica.....	20

3.2.2	Inclusión de la curva PQ.....	20
3.2.3	Inclusión del código de red	21
3.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS	22
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	22
4.1	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PRUEBA	22
4.2	PARAMETRIZACIÓN DE LA CURVA P/Q DEL DFIG.....	24
4.3	CASOS DE ESTUDIO	28
4.3.1	Caso 1.....	28
4.3.2	Caso 2.....	30
4.3.3	Caso 3.....	32
4.3.4	Caso 4.....	34
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	36
5.1	CONCLUSIONES.....	36
5.2	RECOMENDACIONES	37
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
7	ANEXOS	40

RESUMEN

En la última década, la energía eólica se ha posicionado como la segunda fuente de generación de electricidad no convencional a nivel global. Este fenómeno se ha visto impulsado por diversos factores, entre los cuales destacan la disminución de los costos asociados en la instalación, el creciente interés sobre la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero al ambiente y avances tecnológicos en la explotación y control de la energía contenida en el viento. El principal tipo de aerogenerador utilizado en los sistemas eléctricos es el generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) el que permite convertir la energía eólica a energía eléctrica de forma eficiente y versátil debido a su capacidad para operar a un amplio rango de velocidades del viento para obtener mayor potencia eléctrica. Dado que la conexión de una gran potencia proveniente de una central eólica establece retos a la ingeniería en la operación de la red eléctrica, hace necesario conocer el impacto de la potencia activa y reactiva en la barra de conexión de este tipo de centrales. Este Trabajo de Integración Curricular busca desarrollar una herramienta computacional para la determinación de la curva PQ de un aerogenerador DFIG en el punto de conexión al sistema eléctrico de la central eólica mediante el software de ingeniería PowerFactory ante distintos casos de operación. Los resultados obtenidos de la curva PQ se compararán con los requisitos establecidos por el operador en los códigos de red.

PALABRAS CLAVE: Energía eólica, Códigos de Red, Modelación de Sistemas de Potencia, Aerogenerador DFIG

ABSTRACT

Over the past decade, wind energy has solidified its position as the second-largest contributor to non-conventional electricity generation globally. Diminishing installation costs, a heightened commitment to curbing greenhouse gas emissions, and notable technological strides in wind energy exploitation and control contribute to this surge. Moreover, at the forefront of electrical systems, the doubly fed induction generator (DFIG) stands out as the primary wind turbine type. Renowned for its efficiency and versatility, DFIG adeptly converts wind energy into electrical power across a wide spectrum of wind speeds, optimizing overall power output. Nevertheless, integration of substantial power from wind power plants introduces complex engineering challenges in the seamless operation of the electrical network. Notwithstanding DFIG's efficiency, a thorough understanding of the impact of active and reactive power at the bus bar connection of these power plants becomes paramount. To address this need, this Curricular Integration Work endeavors to develop a sophisticated computational tool. Leveraging the engineering software PowerFactory, this tool aims to determine the PQ curve of a DFIG wind turbine at its point of connection to the electrical system of the wind power plant, exploring diverse operational scenarios. Ordinarily, the results gleaned from the PQ curve will undergo meticulous comparison against the stringent requirements outlined in the grid codes by the operator.

KEYWORDS: Wind Energy, Grid Codes, Power System Modeling, Wind Turbine DFIG

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ENERGÍA EÓLICA

Actualmente, la sociedad utiliza la electricidad como un pilar fundamental para el desarrollo de las diferentes actividades. Situación que requiere del uso de nueva generación para abastecer la demanda de manera sostenible y considerando el impacto ambiental [1]. La mayor parte de la energía eléctrica producida es de manera convencional, a través de centrales que usan fuentes combustibles fósiles, gas natural, energía nuclear y agua, estas con excepción de las hidroeléctricas tienen un impacto negativo en el ambiente [2].

En la Figura 1.1 se observa el crecimiento de la capacidad de generación renovable en los últimos años. Para el año 2022 la capacidad de generación renovable mundial alcanzó los 3372 GW lo que representa un crecimiento de 296 GW (9.6%) con respecto al año 2021, de los cuales 192 GW(64.86%) corresponde a la tecnología solar, 75 GW (25.34%) en generación eólica, 8 GW (2.70%) en tecnología de bioenergía y 21 GW (7.1%) en hidroeléctrica [3].

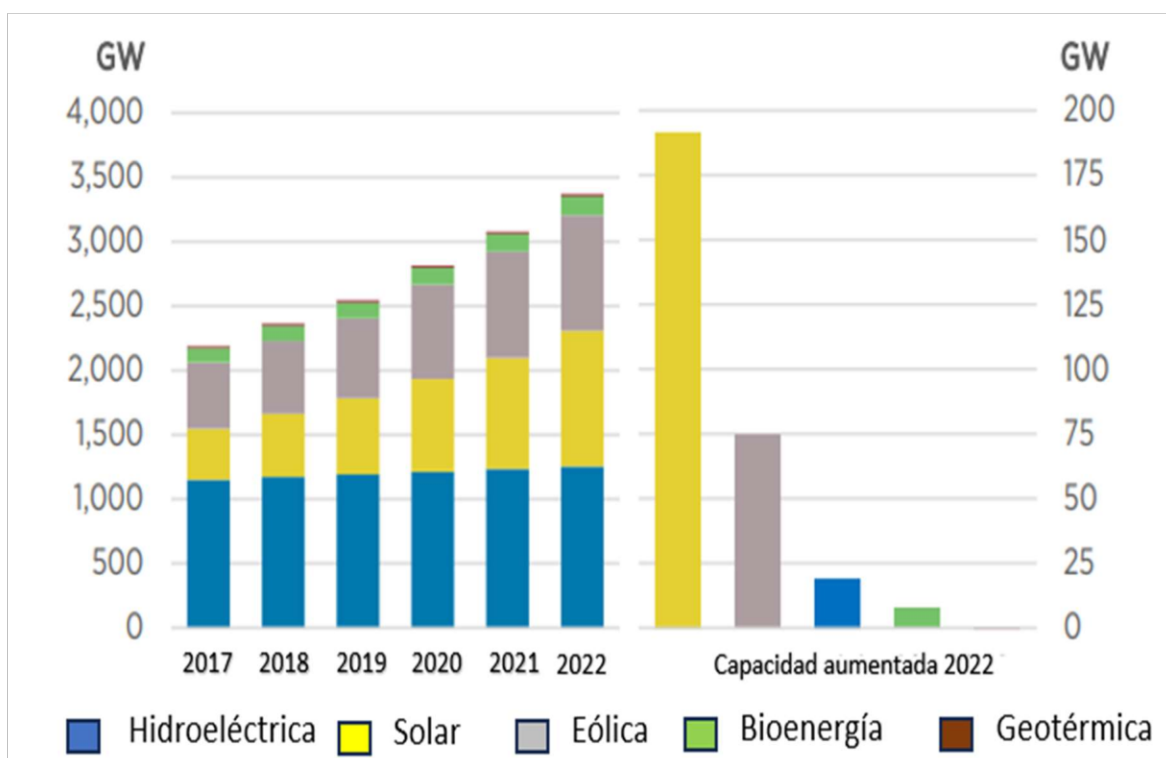


Figura 1.1 Distribución de Generación Renovable [3]

A finales del año 2022 se muestra en La Figura 1.2 la distribución de la capacidad de generación mundial donde se puede observar que la generación solar y eólica son las dos tecnologías de generación con fines eléctricos más dominantes, luego de la hidroeléctrica [3].

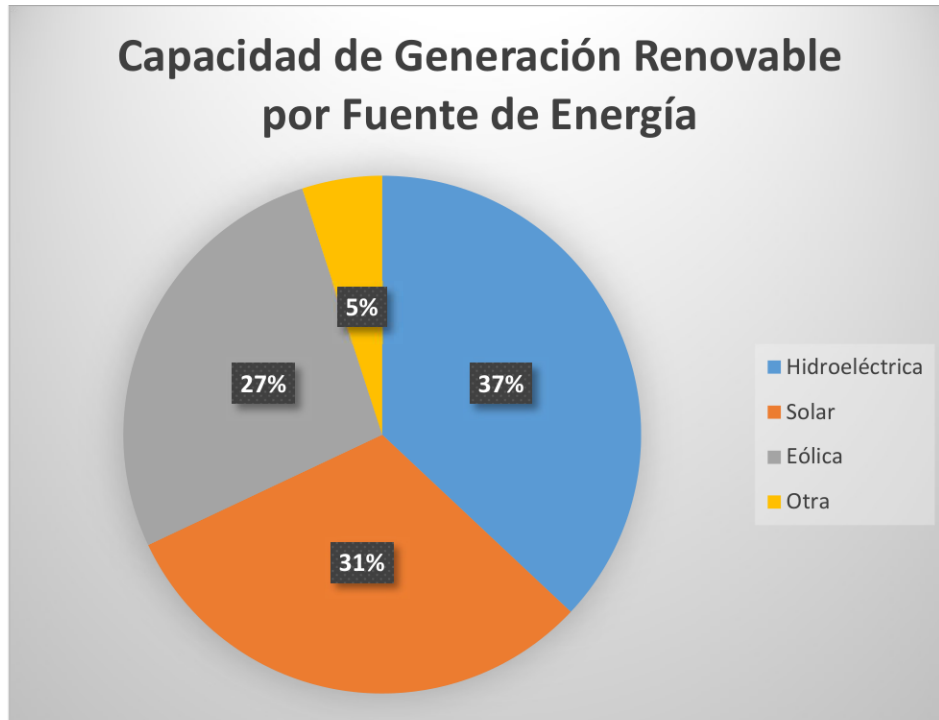


Figura 1.2 Capacidad Generación Renovable Mundial [3]

El sistema eléctrico del Ecuador no es la excepción, ya que, la generación eólica para el año 2023 en el sistema eléctrico continental representa 66.5 MW distribuido en la central Villonaco (16.5MW) y la central Huascachaca (50 MW) [4].

Los sistemas eléctricos deben considerar la naturaleza estocástica del viento, lo que se ha constituido en un reto de la ingeniería. Debido a que esta tecnología de generación eléctrica requiere de controles adicionales por la variación de voltaje y potencia en el punto de conexión al sistema. Por este motivo, es importante determinar la característica operativa de potencia activa y reactiva con sus respectivos límites para los aerogeneradores, mediante lo cual sea posible obtener la máxima potencia despachable sin que afecta las condiciones de calidad y seguridad del sistema establecidas en la normativa de cada sistema eléctrico [5].

Como los parques eólicos deben cumplir requisitos similares a los de las centrales eléctricas convencionales debido a su alta penetración y a la madurez de su tecnología. Los nuevos códigos de red de los sistemas eléctricos exigen que los parques eólicos no

sólo suministren potencia activa, sino que también suministren o consuman potencia reactiva hacia o desde la red. Los requisitos se definen sobre la base del factor de potencia en función del voltaje en el punto de conexión común (PCC) con la red principal [6].

1.2 TIPOS DE AEROGENERADORES

La generación eólica explota la energía cinética contenida en el viento. En la Figura 1.3 se muestra el esquema de la conversión de la energía del viento en eléctrica mediante el uso de turbinas eólicas, que por lo general, utilizan generadores sincrónicos o asíncrónicos que pueden estar directa o indirectamente conectados a la red [5]. Los aerogeneradores se encargan de convertir la energía eólica, en energía mecánica rotacional y mediante un campo electromagnético obtener energía eléctrica, debido a la estocasticidad del viento los aerogeneradores se clasifican en velocidad fija o variable como se muestra en la Figura 1.4 [1].

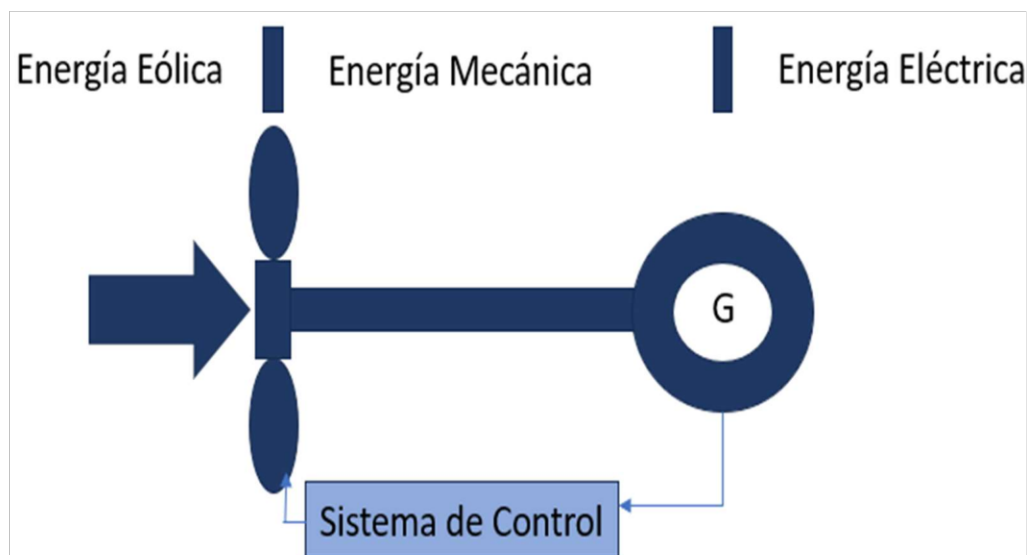


Figura 1.3 Sistema de Generación Eólico [5]

Los aerogeneradores de velocidad fija son generadores de inducción y mientras que los de velocidad variable son de inducción o sincrónicos. De entre los aerogeneradores de inducción el denominado doblemente alimentado (DFIG), se diseña de tal manera en que el rotor y el estator se conecten mediante convertidores independientes a la red eléctrica. Este tipo de generador presenta la capacidad de conectarse a la red eléctrica de manera más flexible, trabajando en un rango de velocidades de viento variable, lo que permite una conversión de energía más eficiente al aprovechar mejor el recurso primario, sin embargo requiere un sistema de control más complejo debido al convertidor, con el fin de realizar la transferencia de potencia de forma bidireccional [1].

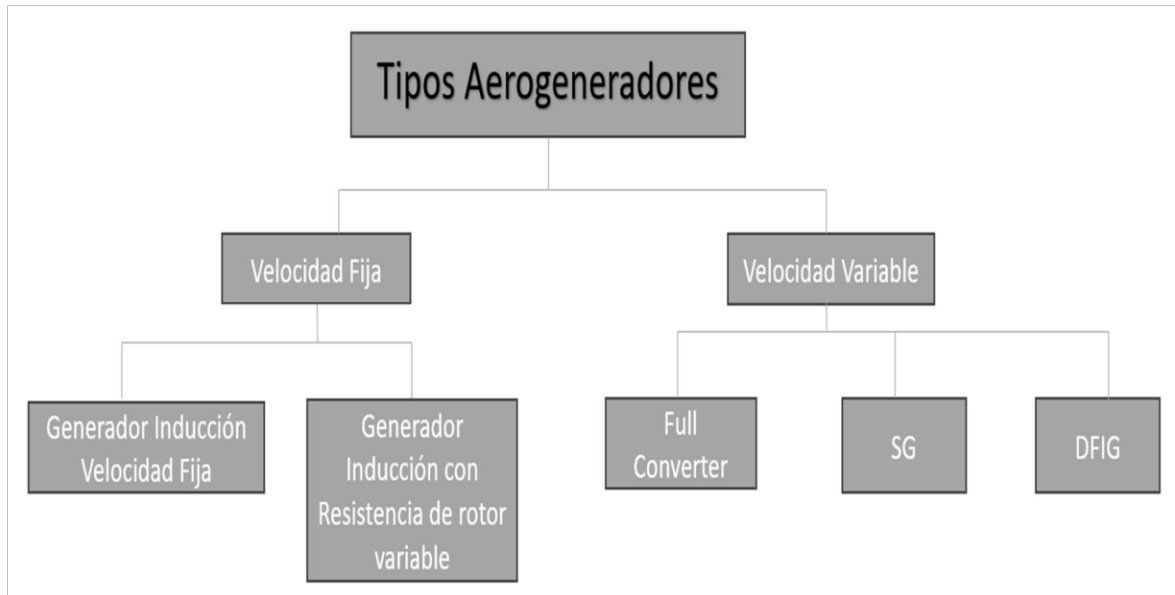


Figura 1.4 Tipos de Aerogeneradores [1]

La normativa IEC 61400-27-1 clasifica a los aerogeneradores en 4 modelos de turbinas para aerogeneradores que pueden ser utilizados en simulaciones dinámicas, se describen las topologías y configuraciones genéricas de los aerogeneradores generalmente utilizados en el sistema [7].

- Tipo 1: Generador de Inducción (FSIG) de velocidad fija.
- Tipo 2: Generador de Inducción con resistencias variables en el rotor de velocidad fija
- Tipo 3: Generador de Inducción Doblemente Alimentado (DFIG) de velocidad variable
- Tipo 4: Generador Sincrónico Full Converter (SGFC) de velocidad variable.

El aerogenerador DFIG es una turbina eólica de velocidad variable que se utiliza habitualmente. Tiene la capacidad de proporcionar un control preciso de la velocidad y un buen factor de potencia con un convertidor de tan sólo el 25% de la potencia nominal de la máquina. El aerogenerador DFIG está ganando popularidad en la generación de energía eólica a gran escala debido a sus ventajas, como la mejora de la calidad de la energía, la alta eficiencia energética, la capacidad de control y la reducción de la potencia nominal del convertidor [6].

1.3 CURVA PQ DEL AEROGENERADOR DFIG

Los fabricantes de aerogeneradores proporcionan estas curvas en las especificaciones técnicas del producto para guiar a los operadores y planificadores de la red eléctrica en su integración eficiente en el sistema eléctrico. Sin embargo, es necesario que el operador/planificador evalúe la viabilidad técnica de conexión a la red de un aerogenerador DFIG analizando sus efectos en las variables eléctricas.

En general, la literatura especializada considera la influencia de una u otra variable de manera particular para construir el modelo dinámico completo, situación que requiere de una alta y compleja información detallada y la experiencia indica que con la consideración de los límites reales de potencia reactiva pueden calcularse a partir de los parámetros del generador y sus respectivos factores limitadores. Más, lamentablemente, estos cálculos suelen requerir parametrización de los distintos elementos y sistemas de control en muchos casos con información operativa en línea. Por tanto, se observa que una aproximación con adecuados criterios de ingeniería permite obtener una razonable curva PQ del aerogenerador DFIG [7] a [9].

De forma general, considera al DFIG constituido por una máquina de inducción de rotor bobinado y el devanado del estator está conectado directamente a la red, mientras que el devanado del rotor se excita a través de un convertidor del lado del rotor (RSC) y el convertidor del lado de la red (GSC) como se muestra en la Figura 1.5. Los principales factores limitantes son: [10]

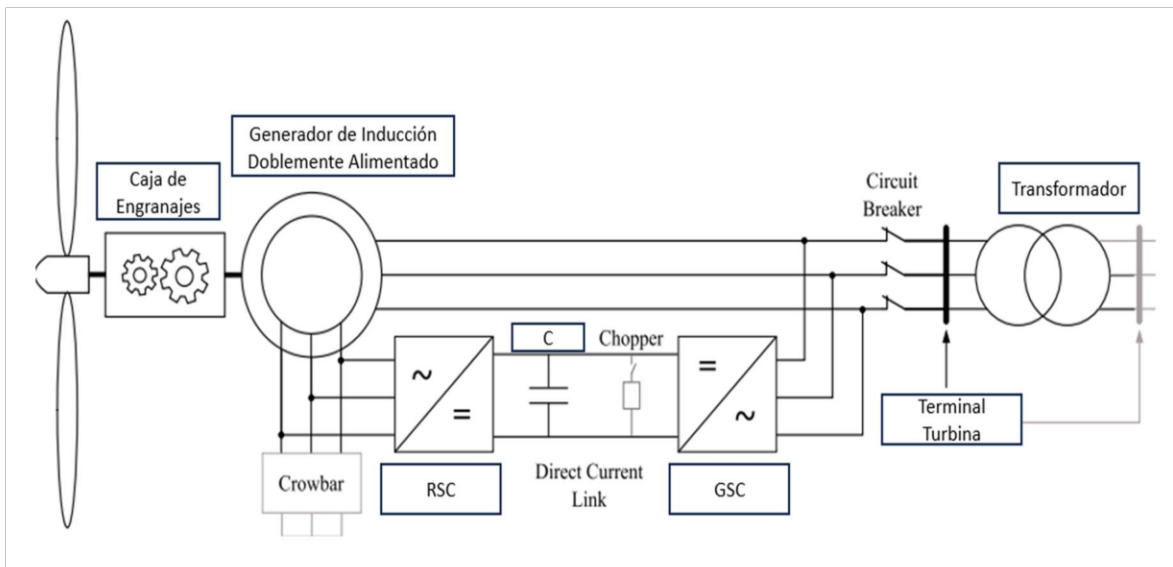


Figura 1.5 Componentes Generador DFIG [11]

- Las limitaciones de corriente del estator. El calentamiento admisible del devanado del estator se expresa como una corriente de estator máxima (I_{maxs}). Este límite corresponde a un círculo centrado en el origen del plano PQ con un radio de magnitud $V \cdot I_{maxs}$.
- La limitación de la corriente del rotor define el límite de potencia reactiva del estator para garantizar que la corriente del rotor no supere el valor máximo (I_{maxr}). Con un factor de potencia de retardo, el límite de corriente del rotor es más restrictivo que el límite del estator. Sin embargo, debido a su naturaleza inductiva, el generador DFIG puede absorber cantidades significativas de potencia reactiva a través del estator.
- La limitación de tensión del rotor corresponde a la limitación de potencia reactiva de la máquina debida a la tensión máxima del rotor. Este límite es de interés para la baja producción de potencia activa cuando el rotor se aproxima a bajas velocidades. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la máquina puede no alcanzar la tensión máxima del rotor en la práctica debido a la desconexión a bajas velocidades del viento. Además, el GSC está limitado por restricciones de sobrecarga y suele estar diseñado para exportar sólo alrededor del 25% de la producción de potencia activa de la máquina a plena carga.
- Por último, la potencia mecánica máxima que puede extraerse de las palas de la turbina es limitada, y la máquina se desconectará del funcionamiento a velocidades del viento elevadas.

Así, en investigaciones anteriores se han centrado en la curva PQ en estado estacionario de un DFIG [12], [13], [14], [15]. Tapia et al. [12] desarrollaron curvas PQ limitando únicamente la corriente del rotor para diversas condiciones de funcionamiento. En [13] presentan curvas PQ para un generador DFIG en diferentes tensiones en bornes considerando únicamente los límites de corriente del rotor. Lund et al. [14] obtuvieron curvas PQ del aerogenerador DFIG imponiendo límites a la corriente del rotor, la corriente del estator y la tensión del rotor. Peterson [15] introdujo la arquitectura del DFIG al utilizar GSC para mejorar su capacidad de potencia reactiva considerando los convertidores en la curva PQ.

En la Figura 1.6 se muestra una curva PQ típica para un aerogenerador DFIG (adaptada de [14], [15]). La misma considera que el aerogenerador se encuentra conectado a la red. Cuando la potencia activa es cero, el aerogenerador se ha desconectado de la red, y la

potencia reactiva del mismo es sólo la disponible del convertidor (GSC) del lado de la red, en general la potencia reactiva depende de los límites indicados [15].

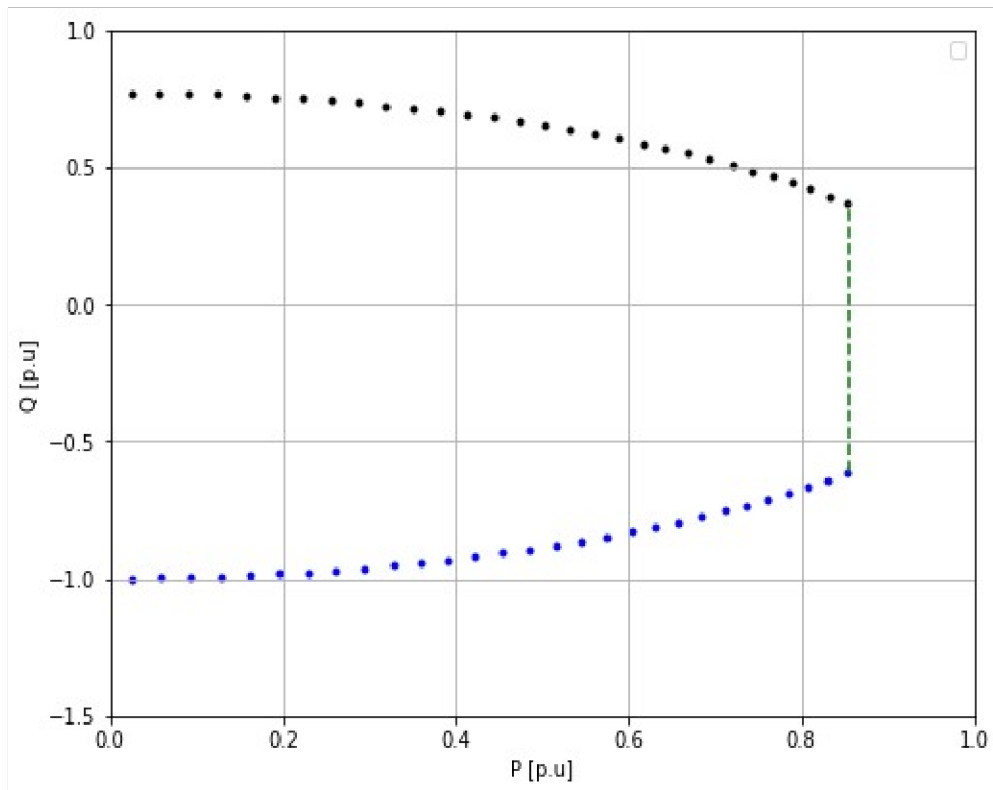


Figura 1.6 Curva PQ típica del aerogenerador DFIG [15]

En [16] se obtiene la curva PQ considerando el modelo T en estado estacionario de la máquina de inducción, para determinar los límites de potencia activa y reactiva considerando los límites de la corriente del rotor y estator.

En [17] se determina la curva PQ para un aerogenerador DFIG. Considerando la influencia de la velocidad del viento en la potencia activa y los límites de la corriente en el rotor y estator para la potencia reactiva en conjunto con los equipos auxiliares y transformador al punto de conexión a la red. En [18] considera el modelo de quinto orden de la máquina de inducción para determinar las variables de tensión y corrientes del rotor y estator para construir la curva PQ. En [19] la curva PQ del aerogenerador DFIG considerando la potencia mecánica máxima de las turbinas de manera adicional a las limitaciones establecidas.

En [20] se desarrolló un enfoque analítico para obtener la curva PQ de un generador DFIG individual y del parque eólico, donde se considera los límites de los convertidores de conexión a la red y una aproximación de los límites de las corrientes del estator y rotor.

1.4 CURVAS PQ EN CÓDIGOS DE RED

Cada sistema eléctrico cuenta con un conjunto de requisitos para la conexión/desconexión del parque eólico a la red, entre ellos está la curva PQ donde se establece límites de los puntos de funcionamiento en el denominado código de red y si el sistema, no lo cuenta, adoptan ciertos parámetros para permitir la conexión en el PCC del aerogenerador. Por lo general, los códigos determinan que la generación eólica debe ser capaz de contribuir al control de la variable frecuencia y voltaje en el PCC del sistema de potencia, además del comportamiento ante condiciones anormales de operación [21],[22].

Los operadores de cada país supervisan y monitorean estos requerimientos de acuerdo al escenario operativo, y dependiendo de la política en seguridad del país los requisitos del código de red, puede ser más estrictos [23]. En la Tabla 1.1 se muestran algunos de los principales requerimientos de diferentes países.

Tabla 1.1 Requerimientos de la curva PQ de acuerdo al código de red del país [19], [24]

País	Variación de voltaje (%)	Q/Potencia instalada (p.u)		P/Potencia instalada (p.u)	
		Sobreexcitado	Subexcitado	Max.	Min.
Alemania	±5	0.48	0.41	1.0	0.1/0.2
Reino Unido	±5	0.34	0.34	1.0	0.5
Perú	±10	0.34	0.34	1.0	0.1
Dinamarca	±5	0.4	0.3	1.0	0/0.2

En Ecuador no existe un código de red. Sin embargo, se ha establecido la regulación ARCONEL 004/15 la cual establece requisitos de conexión para control de potencia reactiva y voltaje donde especifica que independientemente del nivel del voltaje del PCC el aerogenerador debe presentar un factor de potencia de 0.95 en adelanto o atraso, para la potencia despachada entre 0.2 y 1 p.u; con un rango de voltaje de 0.95 y 1.05 p.u [25].

Contar con una herramienta para la construcción de la curva PQ por medio de la cual sea posible conocer los límites que afecten el despacho del aerogenerador DFIG, resulta interesante. Los softwares de ingeniería se caracterizan por contar con módulos de creación de modelos estacionarios y dinámicos, simuladores en el dominio del tiempo las diferentes variables de un elemento o dispositivo del sistema eléctrico; mediante obtención

de variables del sistema o procesadas establecer programas para la determinar parámetros o gráficas que permitan al ingeniero y/o operador contar con insumos para la supervisión, monitoreo y control de la operación del sistema eléctrico. Estas características lo cuentan PowerFactory y permitirán alcanzar el objetivo del trabajo de integración curricular.

1.5 OBJETIVO GENERAL

Establecer una herramienta computacional para obtener la curva P/Q de un aerogenerador DFIG mediante PowerFactory.

1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Revisar el estado del arte sobre las técnicas existentes para la obtención de la curva PQ y parámetros de operación establecidos en el código de red de un SEP para los aerogeneradores DFIG.
2. Establecer las limitaciones de los aerogeneradores para la construcción de la curva PQ.
3. Modelar el aerogenerador DFIG y obtener la curva P/Q mediante simulaciones en un sistema de prueba utilizando PowerFactory.
4. Obtener resultados de las variables de interés de la curva PQ y compararlas con los establecidos con un código de red.

1.7 ALCANCE

Este Trabajo de Integración Curricular busca desarrollar una herramienta computacional para determinar la curva PQ en el punto de conexión de un aerogenerador DFIG y a través del software de ingeniería PowerFactory incluir esta en un sistema de generación eólico.

Para alcanzar este objetivo se llevará adelante una revisión de la literatura especializada para conocer los límites y relaciones de las diferentes variables que determinan la curva PQ de un aerogenerador DFIG ante distintos escenarios de operación del sistema donde se encuentre conectado el aerogenerador.

Con la curva PQ determinada para el aerogenerador DFIG compararla con los códigos de red de sistemas eléctricos existentes y así determinar el cumplimiento o no de los requisitos de conexión ante distintos escenarios operativos simulados en PowerFactory.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 MODELACIÓN AEROGENERADOR DFIG [14]

El software de ingeniería PowerFactory cuenta con modelos matemáticos de aerogeneradores, en este trabajo de titulación se utilizará el modelo DFIG que en el software corresponde al modelo tipo 3A del que se obtendrá su curva P/Q y se la utilizará en un sistema de prueba considerando un código de red para su análisis.

Como se indicó en la sección anterior el aerogenerador DFIG presenta la posibilidad de absorber y entregar reactivos a la red eléctrica y mediante sus convertidores es posible cambiar su factor de potencia. La inclusión de la curva P/Q ayuda a considerar su efecto en los estudios de flujo de potencia, análisis dinámico en el dominio del tiempo denominado RMS [26].

El modelo del aerogenerador DFIG parte de la relación entre los voltajes y corrientes del rotor y estator establecidos en las ecuaciones 2.1 y 2.2 [14].

$$(R_s + j\omega_s\sigma_s L_m)I_s + j\omega_s L_m(I_s + I_r) = V_s \quad (2.1)$$

$$(R_r + j(\omega_s - \omega_r)\sigma_r L_m)I_r + j(\omega_s - \omega_r)L_m(I_s + I_r) = V_r \quad (2.2)$$

Donde:

R_s es la resistencia del estator.

X_s es la reactancia de dispersión del estator.

R_r es la resistencia del rotor (referida al lado del estator).

X_r es la reactancia de dispersión del rotor (referida al lado del estator).

X_m es la reactancia de magnetización.

L_m es la inductancia de magnetización.

ω_s velocidad del estator.

ω_r velocidad del rotor.

σ_s coeficiente de dispersión del rotor.

σ_r coeficiente de dispersión del estator.

I_s es la corriente del estator.

I_r es la corriente del rotor.

V_s es el voltaje del estator.

V_r es el voltaje del rotor.

Dado que la máquina de inducción es asíncrona el rotor se encuentra a una velocidad angular diferente a la del estator, característica denominada deslizamiento "s" como lo establece la ecuación 2.3, es posible obtener la ecuación 2.4 a partir de la ecuación 2.2.

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (2.3)$$

$$\left(\frac{R_r}{s} + j\omega_s \sigma_r L_m \right) I_r + j\omega_s L_m (I_s + I_r) = \frac{V_r}{s} \quad (2.4)$$

Mediante las ecuaciones 2.1 y 2.4 es posible establecer el circuito equivalente de la máquina de inducción como se observa en la Figura 2.1 al cual se le conoce como el modelo T de la máquina de inducción.

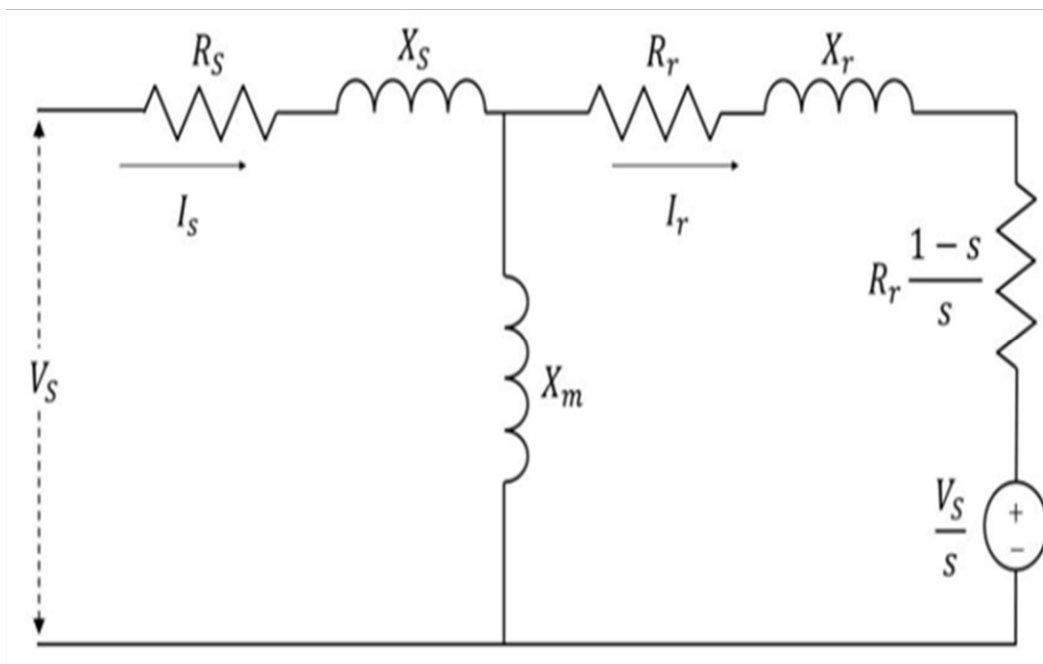


Figura 2.1 Modelo de la máquina de inducción [14]

2.2 LÍMITES DE LA CURVA DE CAPACIDAD DEL DFIG [9], [14], [27]

Mediante el uso del modelo de la máquina de inducción, la operación del aerogenerador DFIG se puede caracterizar mediante 3 variables: la potencia activa, la potencia reactiva y el voltaje del estator [27]. Si se considera un voltaje del estator constante, los límites de potencia reactiva se definen por la máxima corriente del rotor, voltaje del rotor y la corriente del estator [14].

2.2.1 Límite de la corriente del rotor

Este límite se obtiene asumiendo una corriente nominal en el rotor en magnitud y un ángulo variable con respecto al voltaje del estator [9].

La potencia aparente del estator en función de la corriente del rotor está dada por la ecuación 2.5. Las impedancias del estator y magnetización se calculan de acuerdo con las ecuaciones 2.6 y 2.7 [14].

$$S_{s, Ir} = -V_s I_s^* = -V_s V_s^* \left(\frac{1}{Z_s + Z_m} \right)^* + I_r^* V_s \left(\frac{Z_m}{Z_s + Z_m} \right)^* \quad (2.5)$$

$$Z_s = R_s + jX_s \quad (2.6)$$

$$Z_m = jX_m \quad (2.7)$$

Donde:

$S_{s, Ir}$ es la potencia aparente del estator en función de la corriente del rotor.

Z_s es la impedancia del estator.

Z_m es la impedancia de magnetización.

El primer término de la ecuación 2.5 es constante, ya que, se asume que el voltaje del estator es constante. De esta manera, se puede representar la potencia mediante una circunferencia con un centro y radio establecido por las ecuaciones 2.8 y 2.9 respectivamente [9].

$$c_{SsIr} = -|V_s|^2 \left(\frac{1}{Z_s + Z_m} \right)^* \quad (2.8)$$

$$r_{SsIr} = |V_s| |I_r| \left| \frac{Z_m}{Z_s + Z_m} \right| \quad (2.9)$$

Donde:

C_{SsIr} es el centro de la circunferencia de la potencia aparente del estator en función de la corriente del rotor

r_{SsIr} es el radio de la circunferencia de la potencia aparente del estator en función de la corriente del rotor

La potencia aparente del estator se puede representar en función del voltaje del estator y la corriente del rotor de acuerdo con la ecuación 2.10 mientras que la impedancia del rotor se calcula de acuerdo con la ecuación 2.11 [14].

$$S_{rIr} = -V_r I_r^* = -I_r I_r^* s \frac{(Z_r + Z_s) Z_m + Z_s Z_r}{Z_s + Z_m} - I_r^* V_s s \left(\frac{Z_m}{Z_s + Z_m} \right) \quad (2.10)$$

$$Z_r = \frac{R_r}{s} + jX_r \quad (2.11)$$

Donde:

S_{rIr} es la potencia aparente del rotor en función de la corriente del rotor.

Z_r es la impedancia del rotor.

De manera similar se puede representar la potencia del rotor mediante una circunferencia con un centro y radio dados por las ecuaciones 2.12 y 2.13 [14].

$$c_{SrIr} = -|I_r|^2 s \frac{(Z_r + Z_s) Z_m + Z_s Z_r}{Z_s + Z_m} \quad (2.12)$$

$$r_{SrIr} = |V_s| |I_r| |s| \left| \frac{Z_m}{Z_s + Z_m} \right| \quad (2.13)$$

Donde:

C_{SrIr} es el centro de la circunferencia de la potencia aparente del rotor en función de la corriente del rotor.

r_{SrIr} es el radio de la circunferencia de la potencia aparente del rotor en función de la corriente del rotor.

El convertidor del lado de la red generalmente se busca que opere lo más cercano al factor unitario, es decir, no entrega ni absorbe potencia reactiva sólo se considera la parte real de la ecuación 2.10. Además, las reactancias son mucho más grandes en comparación con las resistencias comparando las ecuaciones 2.5 y 2.10 se puede aproximar la potencia activa del rotor de acuerdo con la ecuación 2.14 [14].

$$P_r \approx -s * P_s \quad (2.14)$$

Donde:

P_r es la potencia activa del rotor

P_s es la potencia activa del estator

2.2.2 Límite de voltaje del rotor

La potencia aparente del estator se puede calcular con la ecuación 2.15 para un voltaje con magnitud constante y ángulo variable que se puede describir mediante una circunferencia con centro y radio con las ecuaciones 2.16 y 2.17 [9].

$$S_{sVr} = -V_s I_s^* = -V_s \left(\frac{V_s (Z_r + Z_m) - \frac{V_r}{s} Z_m}{(Z_r + Z_s) Z_m + Z_s Z_r} \right)^* \quad (2.15)$$

$$c_{SsVr} = -|V_s|^2 \left(\frac{Z_r + Z_m}{(Z_r + Z_s) Z_m + Z_s Z_r} \right)^* \quad (2.16)$$

$$r_{S_s V_r} = \left| \frac{V_r}{S} \right| |V_s| \left| \frac{Z_m}{(Z_r + Z_s)Z_m + Z_s Z_r} \right| \quad (2.17)$$

Donde:

S_{s_Vr} es la potencia aparente del estator en función del voltaje del rotor.

$C_{S_s V_r}$ es el centro de la circunferencia de la potencia aparente del estator en función del voltaje del rotor.

$r_{S_s I_r}$ es el radio de la circunferencia de la potencia aparente del estator en función del voltaje del rotor.

La potencia aparente del rotor se puede calcular análogamente a la del estator con la ecuación 2.18, pero también se puede aproximar de manera similar al límite anterior con la ecuación 2.14.

$$S_{r_Vr} = -V_r I_r^* = -V_r \left(\frac{-V_s Z_m + \frac{V_r}{S} (Z_s + Z_m)}{(Z_r + Z_s)Z_m + Z_s Z_r} \right)^* \quad (2.18)$$

Donde:

S_{r_Vr} es la potencia aparente del rotor en función del voltaje del rotor.

2.2.3 Límite de la corriente del estator

La potencia aparente del estator es una función que depende directamente de la corriente del estator como se muestra en la ecuación 2.19 y se puede representar mediante una circunferencia con centro y radio de acuerdo con las ecuaciones 2.20 y 2.21. La potencia del rotor se calcula de acuerdo con la ecuación 2.14 [14].

$$S_{s_I s} = -V_s I_s^* \quad (2.19)$$

$$C_{S_s I_s} = 0 \quad (2.20)$$

$$r_{SsIs} = |I_s| |V_s| \quad (2.21)$$

Donde:

$S_{s,Is}$ es la potencia aparente del estator en función de la corriente del estator.

$C_{Ss,Is}$ es el centro de la circunferencia de la potencia aparente del estator en función de la corriente del estator.

$r_{Ss,Is}$ es el radio de la circunferencia de la potencia aparente del estator en función de la corriente del estator.

2.2.4 Límite de la potencia mecánica

Se establece un límite de potencia máxima debido a la parte constructiva del generador para evitar daños mecánicos, esto se hace mediante un valor constante de acuerdo con la ecuación 2.22. El límite de potencia mecánica máxima se calcula de acuerdo con la ecuación 2.23 de la referencia técnica del modelo de la máquina de inducción del software escogido PowerFactory [28] .

$$P_{mechmax} = P_{max} \quad (2.22)$$

$$P_{max} = 0.95 * \frac{P_n * n_r}{100} \quad (2.23)$$

Donde:

P_n es la potencia activa nominal

n_r es la eficiencia del generador de inducción

2.2.5 Potencia total del aerogenerador DFIG

La potencia total del aerogenerador DFIG es la suma de las potencias del rotor y estator y se puede calcular con las ecuaciones 2.24 y 2.25 [9].

$$P_{tot} = P_r + P_s \approx P_s(1 - s) \quad (2.24)$$

$$Q_{tot} = Q_s \quad (2.25)$$

Donde:

P_{tot} es la potencia activa total del aerogenerador DFIG.

Q_{tot} es la potencia reactiva total del aerogenerador DFIG.

2.3 REQUERIMIENTOS DE LA CURVA PQ EN LOS CÓDIGOS DE RED [19], [29]

2.3.1 Código de red alemán

De acuerdo con el código de red alemán el punto de operación en estado estacionario de potencia reactiva se puede definir en función del factor de potencia, nivel de potencia reactiva o nivel de voltaje [19]. En la Figura 2.2 se observan los requerimientos mínimos para una unidad de generación con un rango de variación de voltaje de $\pm 5\%$.

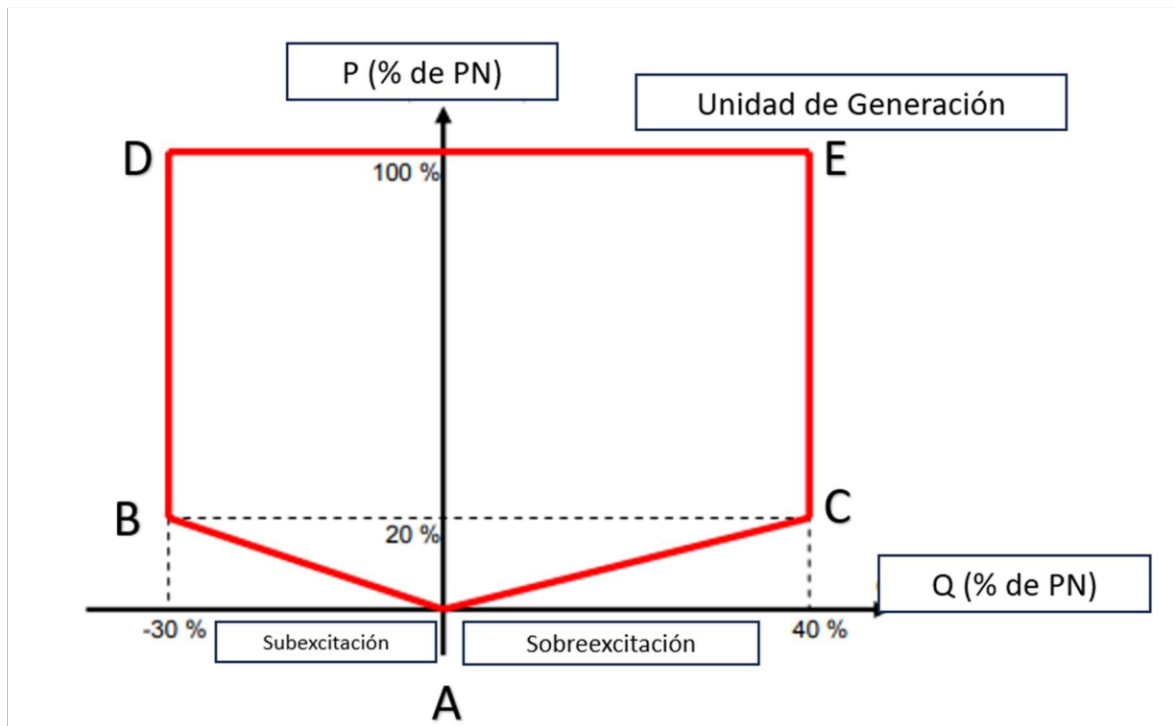


Figura 2.2 Requerimientos Código de Red Alemán [19]

2.3.2 Código de red español

El código de red español especifica los límites a través del diagrama P-Q/P_{max} mostrado en la Figura 2.3 que consta de un marco exterior e interior. El perfil P-Q del parque eólico no deberá quedar fuera del marco interior y la posición del marco deberá estar dentro de los límites del marco exterior [29]. El rango máximo de Q/P_{max} se especifica de acuerdo con el tipo de central (A, B, C, D).

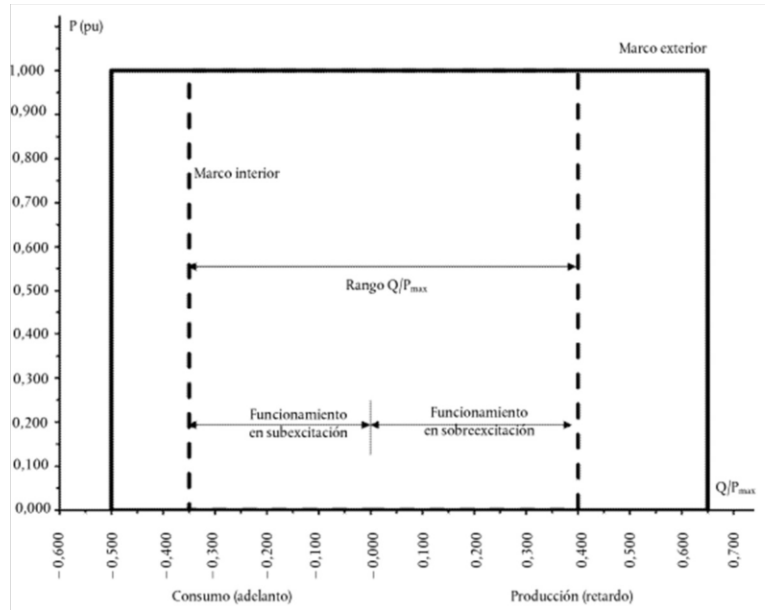


Figura 2.3 Requerimientos código de red español [29]

3 METODOLOGÍA

La implementación y validación de la herramienta desarrollada para determinar la curva P/Q de un aerogenerador DFIG se realizará mediante un script en Python y su resultado parametrizado se coloca en la opción de inclusión de curva de capacidad de PowerFactory. La Figura 3.1 muestra la metodología que permite obtener la curva PQ del sistema y su implementación y análisis con códigos de red mediante el script Wind Farm de PowerFactory.

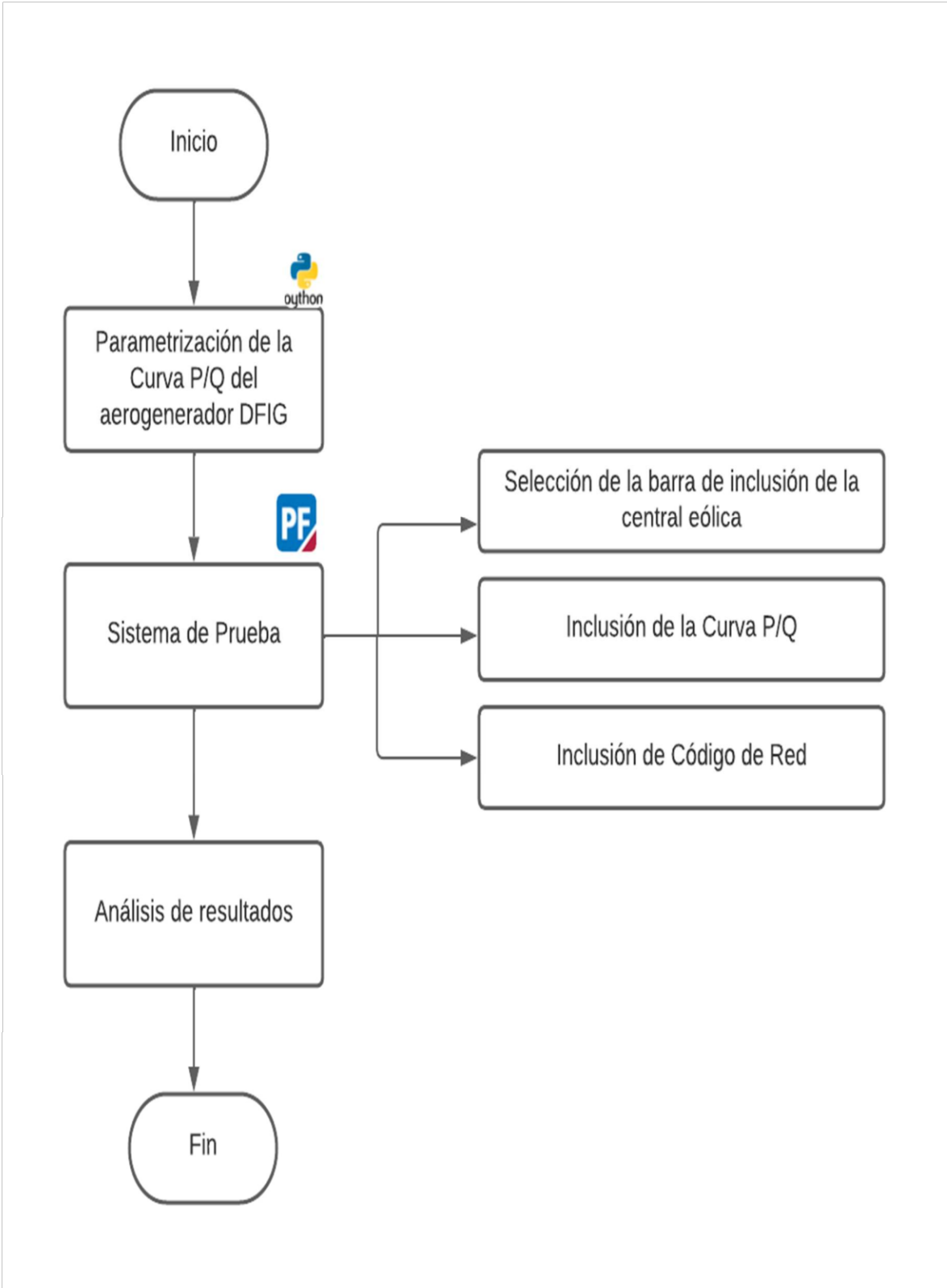


Figura 3.1 Diagrama de la metodología propuesta

3.1 PARAMETRIZACIÓN DE LA CURVA P/Q DEL AEROGENERADOR DFIG

Para obtener la curva PQ del aerogenerador DFIG se utilizará un script de programación en Python en el cual se incluyen las ecuaciones de la sección anterior que permiten calcular las curvas considerando cada límite, cuyo código completo se encuentra en el ANEXO I.

Los datos del generador utilizados en este trabajo se tomaron de la referencia [14] establecidos en el sistema “Wind Farm”, de acuerdo con el ANEXO II.

3.2 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE PRUEBA

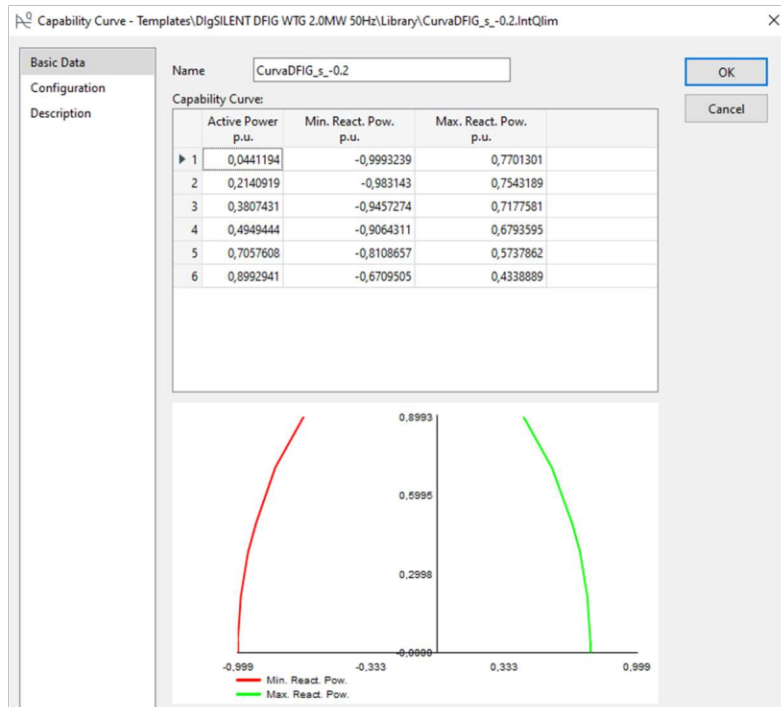
Para este trabajo se consideró un sistema máquina-barra infinita con un sistema de generación eólica con un aerogenerador DFIG conectado a una red en un punto de conexión común (PCC).

3.2.1 Selección de la barra de inclusión de la central eólica

El punto en donde se obtendrá la curva P/Q del sistema es el punto de conexión del aerogenerador con la red representada mediante un equivalente de red donde se selecciona el voltaje del punto de conexión.

3.2.2 Inclusión de la curva PQ

La curva PQ obtenida en base a las ecuaciones de la sección 2, se lo ingresa en PowerFactory como se muestra en la Figura 3.2 en la librería del modelo del aerogenerador DFIG seleccionado en el software PowerFactory. Se incluyen los puntos de los límites laterales y el límite de potencia mecánica en la pestaña “Operational Limits” del aerogenerador.



Active Power Operational Limits

Min. MW

Max. MW

Figura 3.2 Ingreso puntos curva P/Q PowerFactory [30]

3.2.3 Inclusión del código de red

Los códigos de red se ingresan en la pestaña “Requirements” con los puntos de potencia activa y reactiva como se muestra en la Figura 3.3 que se encuentra en las librerías del script utilizado en PowerFactory. Para los códigos de red presentados en la sección anterior, siendo los mismos presentados en el ANEXO III.

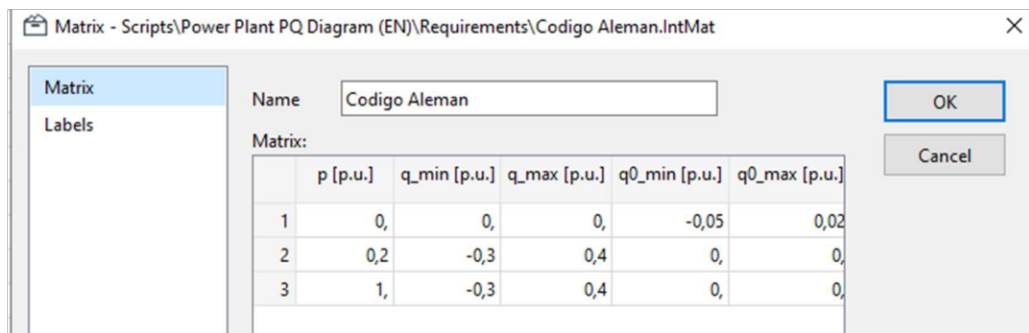


Figura 3.3 Ingreso puntos código de red a PowerFactory [31]

3.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con la curva PQ obtenida para el aerogenerador modelado e ingresado el código de red seleccionado por el usuario, se procederá a ejecutar el script desarrollado por DlgSILENT en el software PowerFactory denominado “Wind Farm PQ Diagram” aplicado al sistema de prueba considerando varios casos de operación del aerogenerador. Con esto determinar el cumplimiento o no de la curva PQ respecto al código de red.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PRUEBA

El sistema de prueba implementado para la validación de la herramienta de este trabajo se muestra en la Figura 4.1. El mismo es del ejemplo proporcionado en el software PowerFactory denominado “Wind Farm”, en el cual, para este trabajo sólo se utiliza uno de los 6 generadores de 2 MW, 50 Hz que está conectado al sistema a 20 kV cuyo detalle de los parámetros se presentan en el ANEXO II [32].

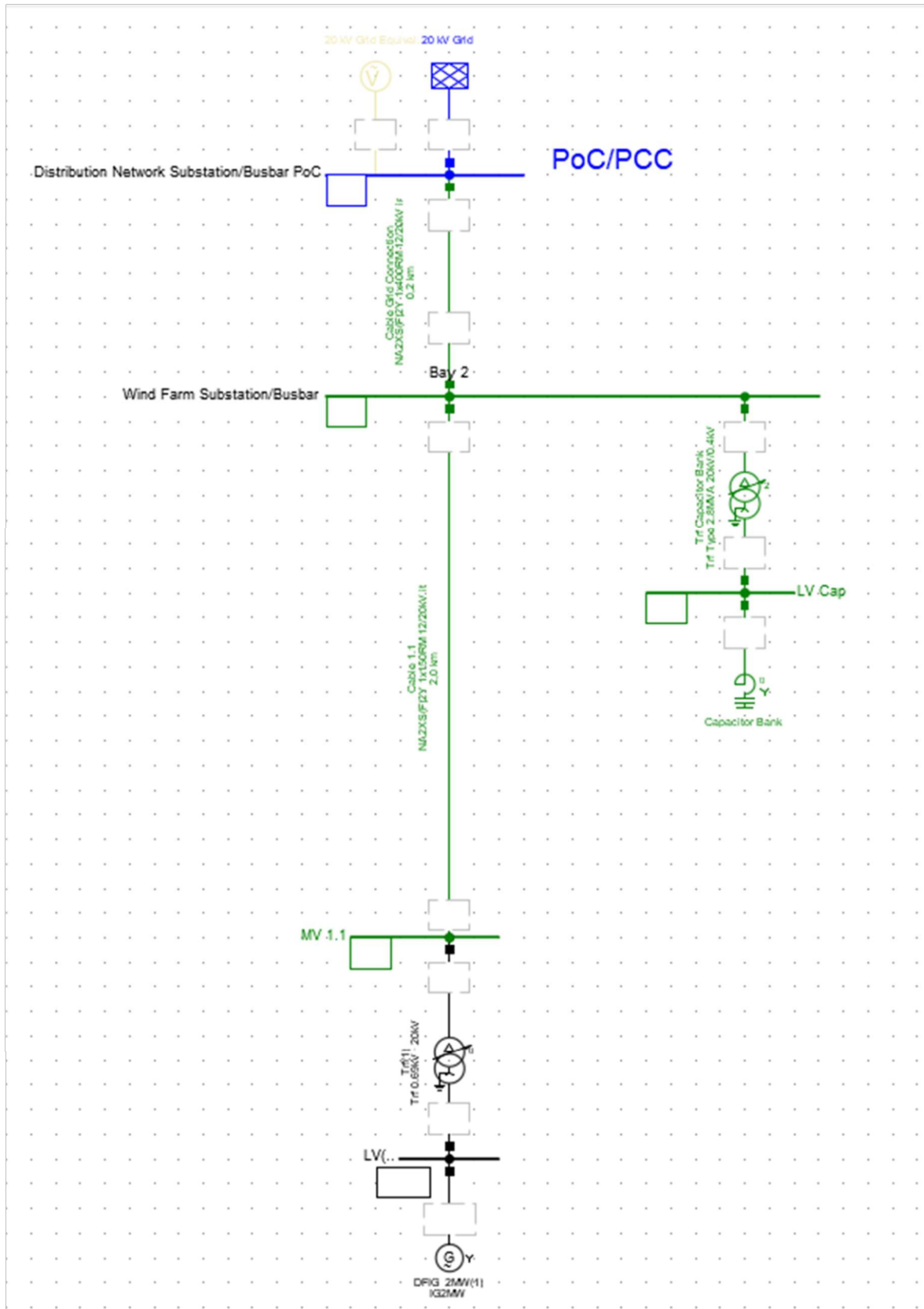


Figura 4.1 Sistema de prueba "Wind Farm" [32]

4.2 PARAMETRIZACIÓN DE LA CURVA P/Q DEL DFIG

Por medio de la herramienta desarrollada se obtiene la curva PQ para el aerogenerador modelado cuyos datos se presentan en el ANEXO II como se observa en la Figura 4.2 para el caso considerando una velocidad del rotor superior a la del estator, es decir, un deslizamiento de -0.1 como lo establece la ecuación 2.3, la región de sobreexcitación la determina la corriente del rotor donde se alcanza como valor máximo 0.77 p.u y valor mínimo 0.33 de la potencia reactiva del aerogenerador y la región de subexcitación está dada por la corriente del estator para el caso del aerogenerador modelado donde se alcanza el valor mínimo de -0.999 p.u y valor máximo de 0.58 p.u

El límite de potencia máxima activa que el generador puede alcanzar está determinado por la potencia mecánica máxima a un valor de 0.85 p.u. En esta condición operativa el límite de voltaje del rotor no influye en la curva, ya que, presenta un valor de 6.24 p.u en el eje de la potencia reactiva.

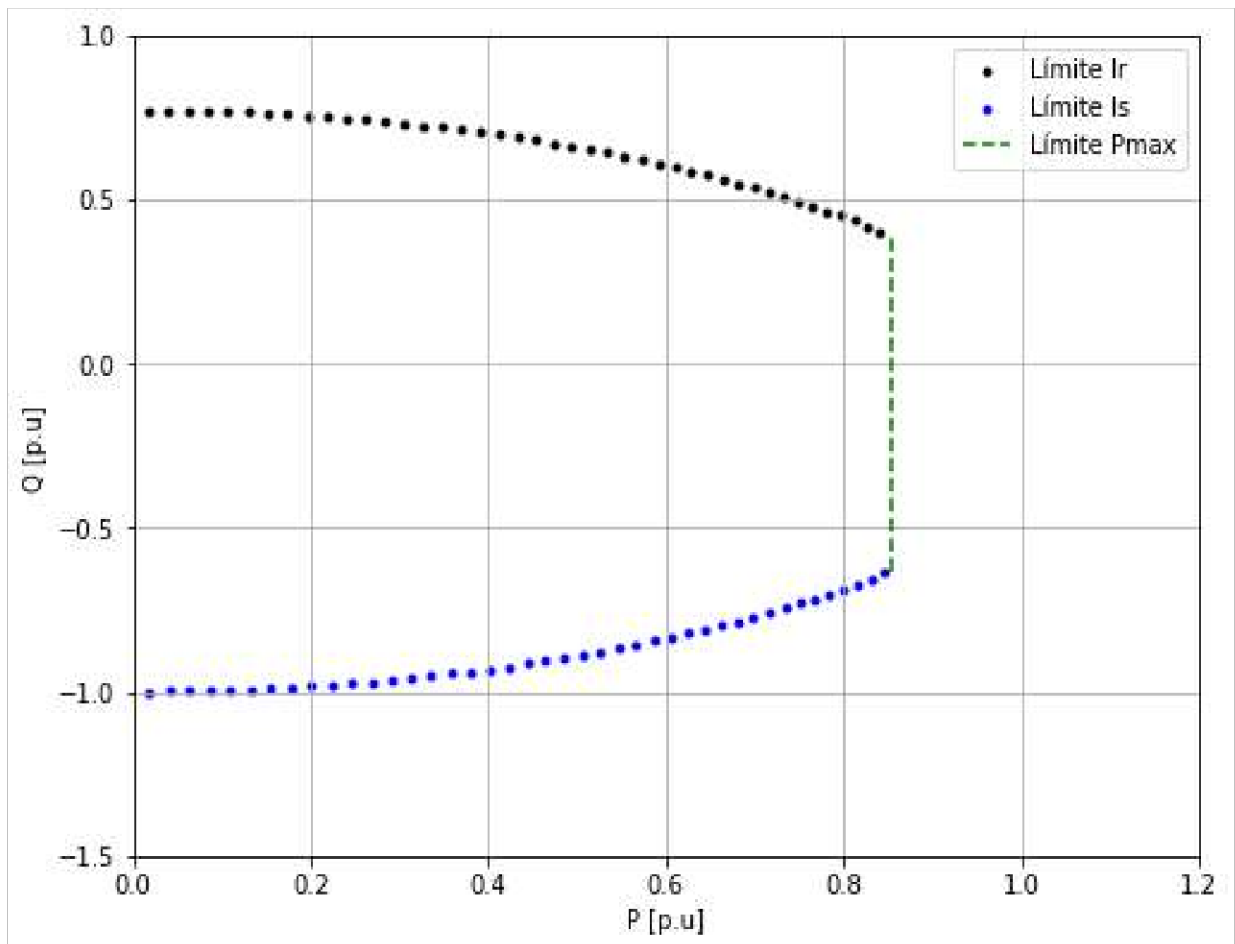


Figura 4.2 Curva PQ del aerogenerador para $s=-0.1$

En la Figura 4.3 considerando una velocidad del rotor menor a la del estator, es decir, un deslizamiento de 0.1, se observa que la región de sobreexcitación la determina la corriente del rotor donde se alcanza como valor máximo de 0.77 p.u y valor mínimo de 0.04 p.u de la potencia reactiva del aerogenerador. La región de subexcitación está dada por la corriente del estator donde se alcanza el valor mínimo de -0.999 p.u y valor máximo de -0.34 p.u.

Al igual que en la condición anterior el límite del voltaje del rotor sale del rango establecido de la figura 4.3. En el límite de la potencia máxima los límites establecidos por la corriente del rotor y del estator casi son semejante debido a que la capacidad máxima de reactivos que se puede obtener en el rotor y estator esta determinada principalmente por la corriente del rotor, corriente del estator y voltaje del estator

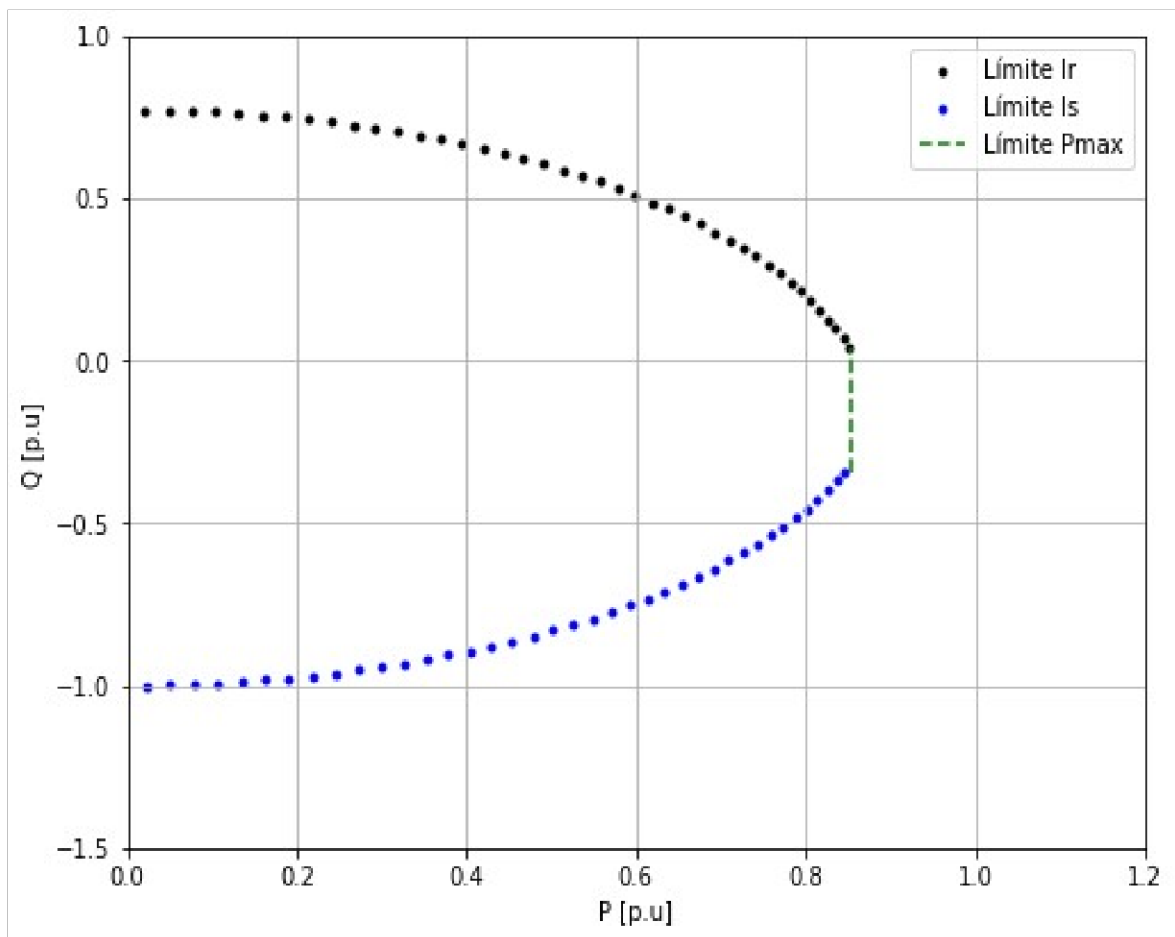


Figura 4.3 Curva PQ del aerogenerador para $s=0.1$

En la Figura 4.4 se observa el caso donde la velocidad del rotor es menor a la del estator, pero se encuentra cercana a la velocidad mínima de operación del aerogenerador con un deslizamiento de 0.22. A diferencia de los casos anteriores el límite en la curva debido al

voltaje del rotor antes que la corriente del rotor en el rango de 0.47 p.u hasta los 0.28 p.u en los reactivos. Mientras que la corriente del rotor en el rango de 0.27 p.u hasta -0.2 p.u en los reactivos y la corriente del estator desde los -0.2 pu hasta -0.99 p.u donde el límite de potencia activa máxima no es alcanzado por el aerogenerador llegando como máximo a los 0.7 p.u.

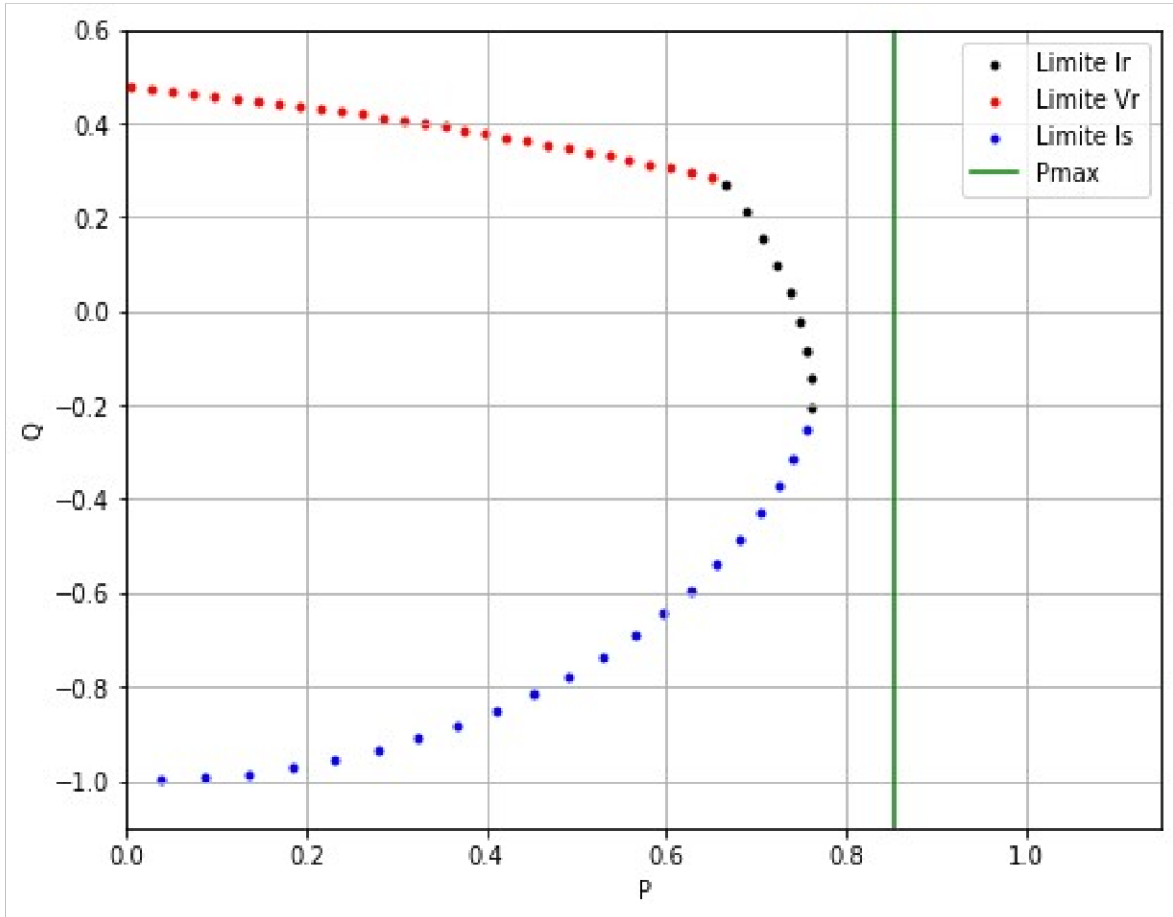


Figura 4.4 Curva PQ del aerogenerador para s=0.22

En la Figura 4.5 se presenta el límite de voltaje del rotor para diferentes deslizamientos, donde para deslizamientos relativamente altos (positivos o negativos) si se limitan considerablemente los reactivos, para deslizamientos pequeños no se limitan los reactivos debido a que la capacidad de potencia reactiva define sus límites máximos con la ecuación 2.17. El deslizamiento se encuentra en el denominador y por tanto cuando mayor sea ese deslizamiento más pequeña será la capacidad de generar y consumir reactivos. Ligeros cambios en el deslizamiento producen una gran limitación de portencia reactiva

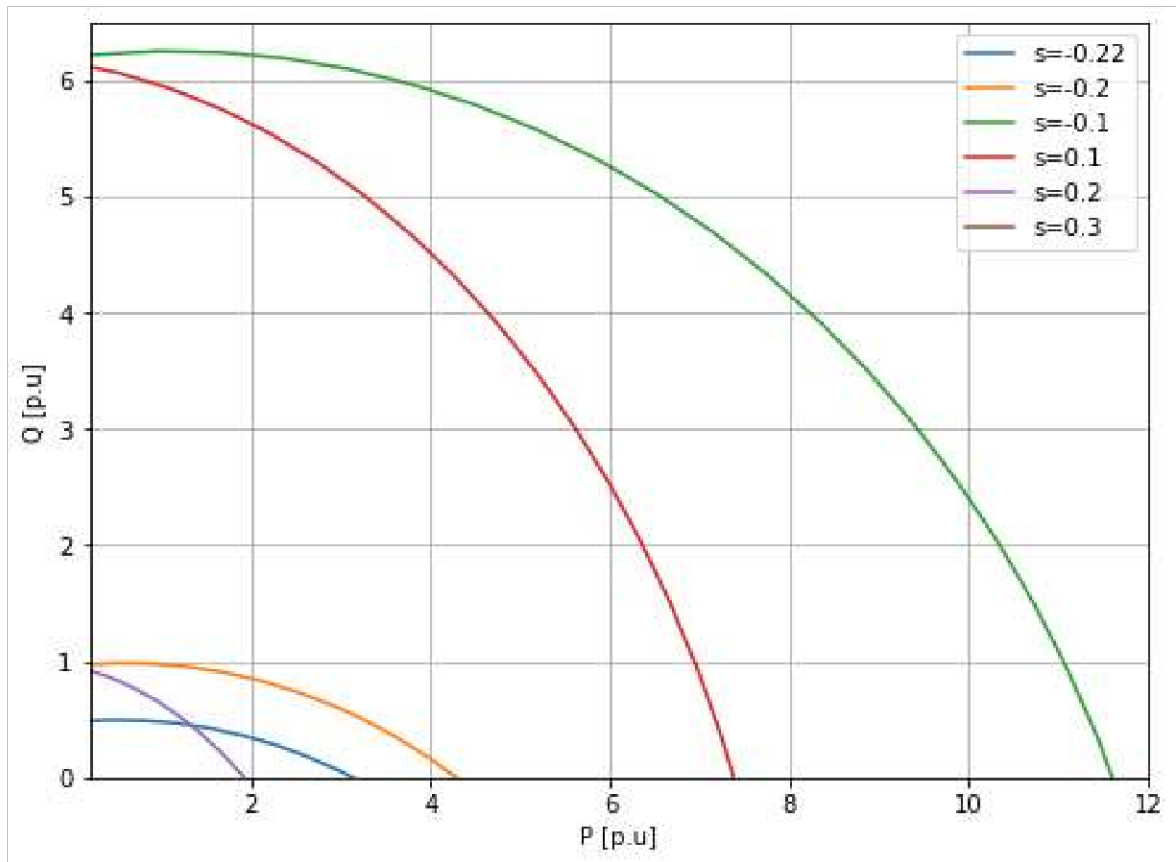


Figura 4.5 Límite de voltaje de rotor para diferentes deslizamientos

En la sección anterior se definió que el voltaje del estator toma un valor constante debido a que este dependerá de la robustez de la red. Este valor constante puede verse afectado por agentes externos modificando su valor. En la Figura 4.6 se muestra la comparación de la curva para diferentes valores donde se observa que a medida que el voltaje aumenta el límite en la región de sobreexcitación y subexcitación se hace más grande.

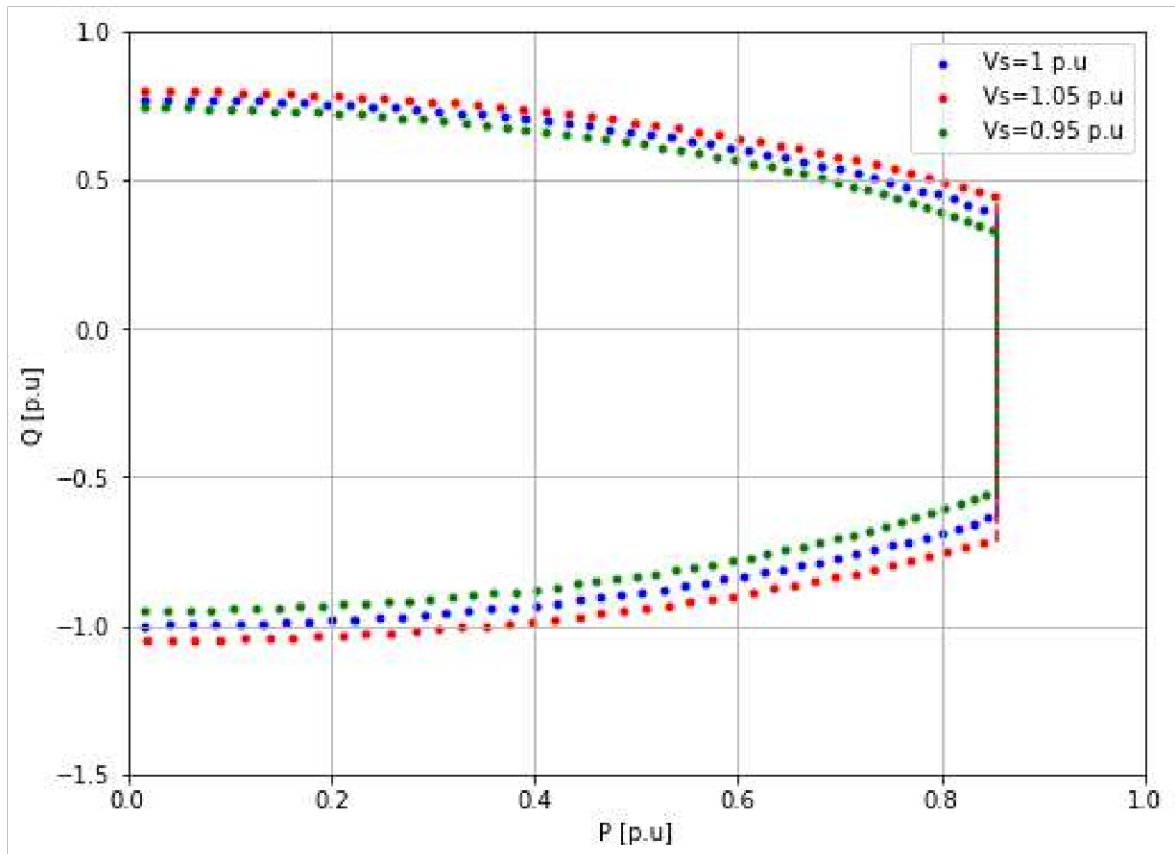


Figura 4.6 Curva PQ para diferentes voltajes de estator

4.3 CASOS DE ESTUDIO

Para realizar la comparación de la curva P/Q obtenida para el aerogenerador y su cumplimiento o no respecto a los códigos de red se establecerán 4 casos de estudio:

- Caso 1: Voltaje en el PCC de 1 p.u y deslizamiento $s=0.1$
- Caso 2: Voltaje en el PCC de 1.075 p.u y deslizamiento $s=0.1$
- Caso 3: Voltaje en el PCC de 0.925 p.u y deslizamiento $s=0.1$
- Caso 4: Voltaje en el PCC de 1 p.u y deslizamiento $s=-0.1$

4.3.1 Caso 1

En la Figura 4.7 se observa en rojo la curva PQ del aerogenerador considerando un deslizamiento de 0.1 obtenida con la herramienta y en azul la curva PQ establecida en el código de red alemán. Dado que la curva roja contiene a la curva azul, situación que indica el cumplimiento del código de red por parte del aerogenerador a excepción de la esquina

superior derecha, donde se observa que debido a la limitación de la corriente del estator el aerogenerador no cumple con código, por lo cual, sería una zona prohibida de operación para el sistema y de ser el caso el operador puede solicitar al aerogenerador llevar adelante medidas para solucionar esta situación, estas medidas exceden el alcance de este trabajo.

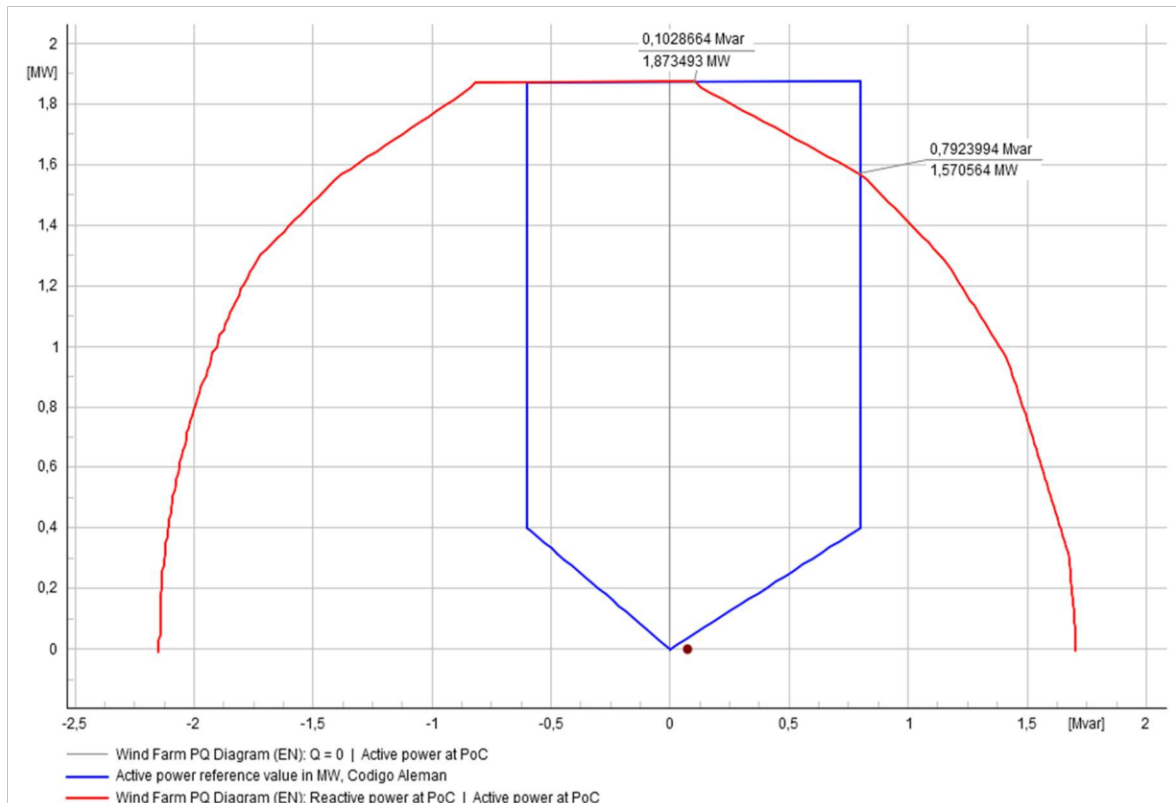


Figura 4.7 Comparación de la curva PQ del aerogenerador vs el código alemán para $s=0.1$ y $V=1$ p.u

En la Figura 4.8 lleva adelante el mismo análisis considerando el código de red español. A diferencia del caso alemán la zona de no cumplimiento es más reducida dado que el código de red español tiene requerimientos más flexibles, situación que determina que las acciones del sistema o del propietario de la central eólica deban ser menos onerosas para poder dar el cumplimiento a los requisitos.

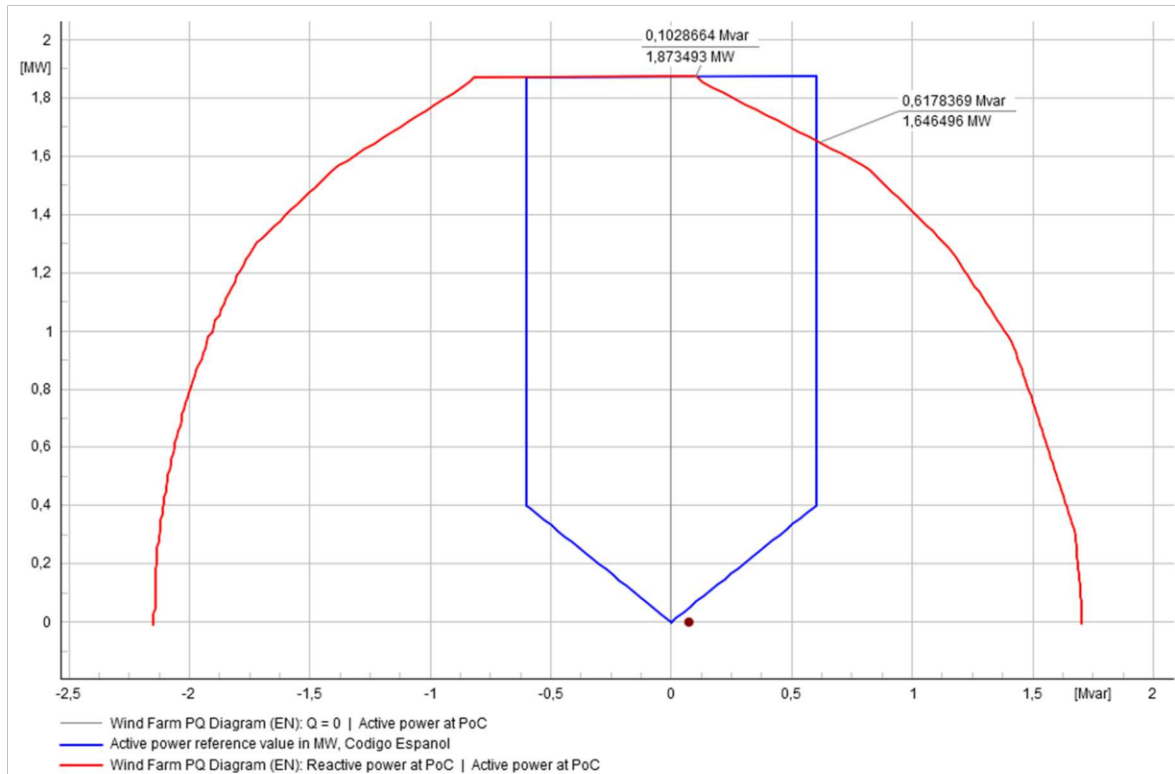


Figura 4.8 Comparación de la curva PQ del aerogenerador vs el código español para $s=0.1$ y $V=1$ p.u

4.3.2 Caso 2

Considerando que por factores del operador o de la misma central el voltaje en el punto de conexión se encuentra por encima de la operación nominal alcanzando el valor de 1.075 p.u la curva PQ del aerogenerador obtenida para el mismo deslizamiento, se presenta en la Figura 4.9 donde se determina que el aerogenerador cumple con los requisitos del código alemán en la zona de subexcitación, mientras que en la zona de sobreexcitación se tiene una zona de operación prohibida para lo cual se deberán instalar acciones correctivas.

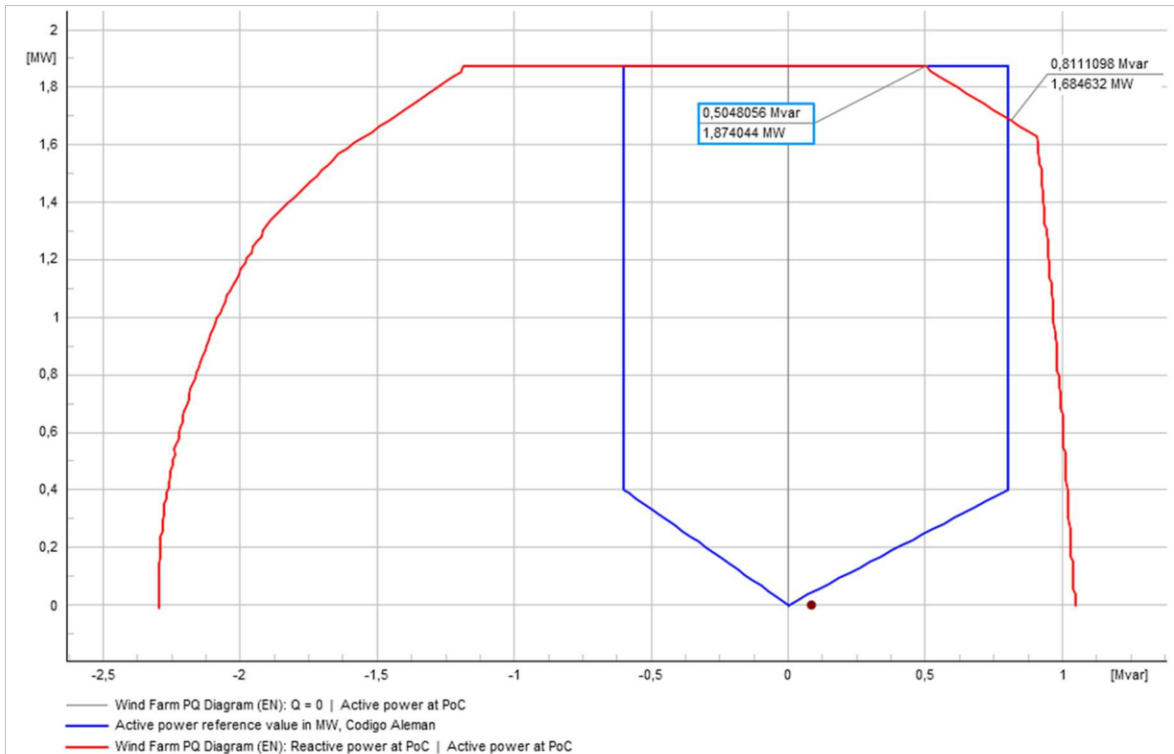


Figura 4.9 Comparación de la curva PQ del aerogenerador vs el código alemán para $s=0.1$ y $V=1.075$ p.u

En la Figura 4.10 se observa en rojo la curva P/Q del aerogenerador obtenida con la herramienta y en azul la curva PQ establecida en el código de red español cuando el voltaje en el PCC es de 1.075 p.u donde se determina que el aerogenerador cumple con los requisitos del código alemán siendo la corriente del estator la limitante y la variable a controlar por parte del propietario de la central ya que se encuentra al límite del código.

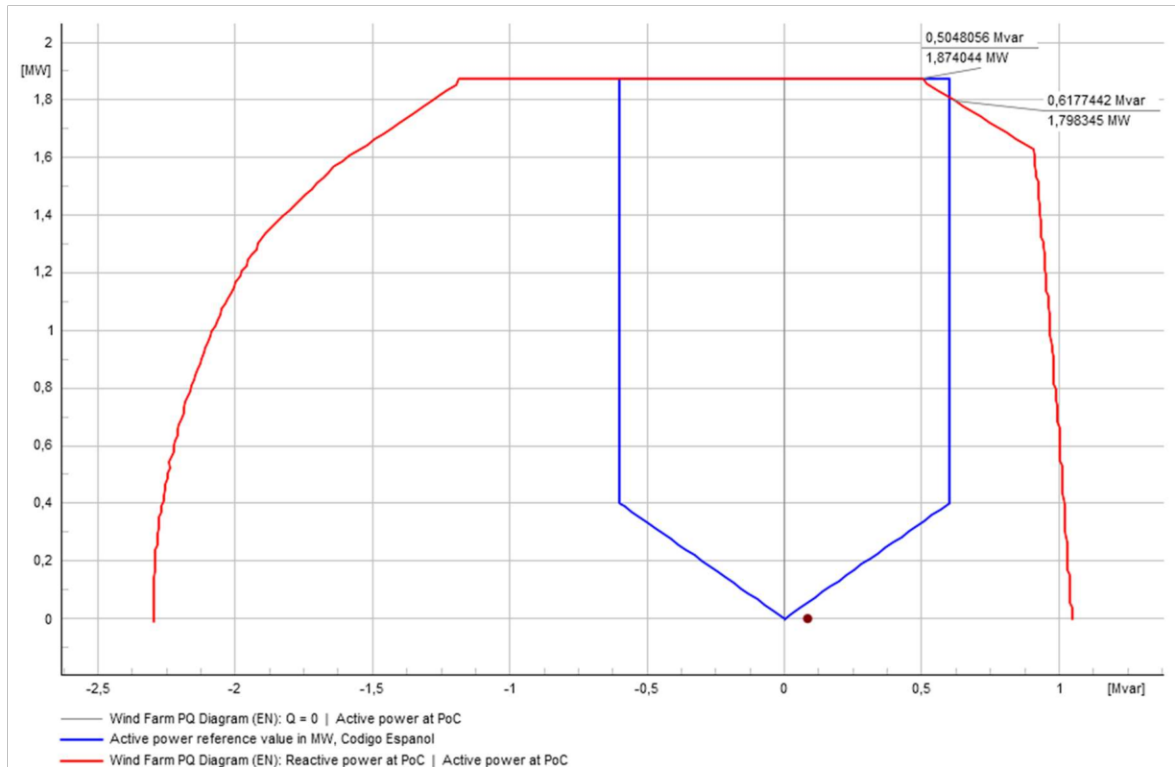


Figura 4.10 Comparación de la curva PQ del aerogenerador vs el código español para $s=0.1$ y $V=1.075$ p.u

4.3.3 Caso 3

En la Figura 4.11 se observa que la curva PQ roja obtenida del aerogenerador para el caso del deslizamiento de 0.1 y un voltaje en la barra PCC de 0.925 situación que afecta el límite de la corriente del estator y la corriente del rotor, estas determinan el no cumplimiento de los requisitos del código alemán. Así, el aerogenerador DFIG para que pueda proporcionar reactivos y cumpla los requisitos del código requiere que el voltaje en la barra PCC se encuentre en un rango de valores cercanos al nominal.

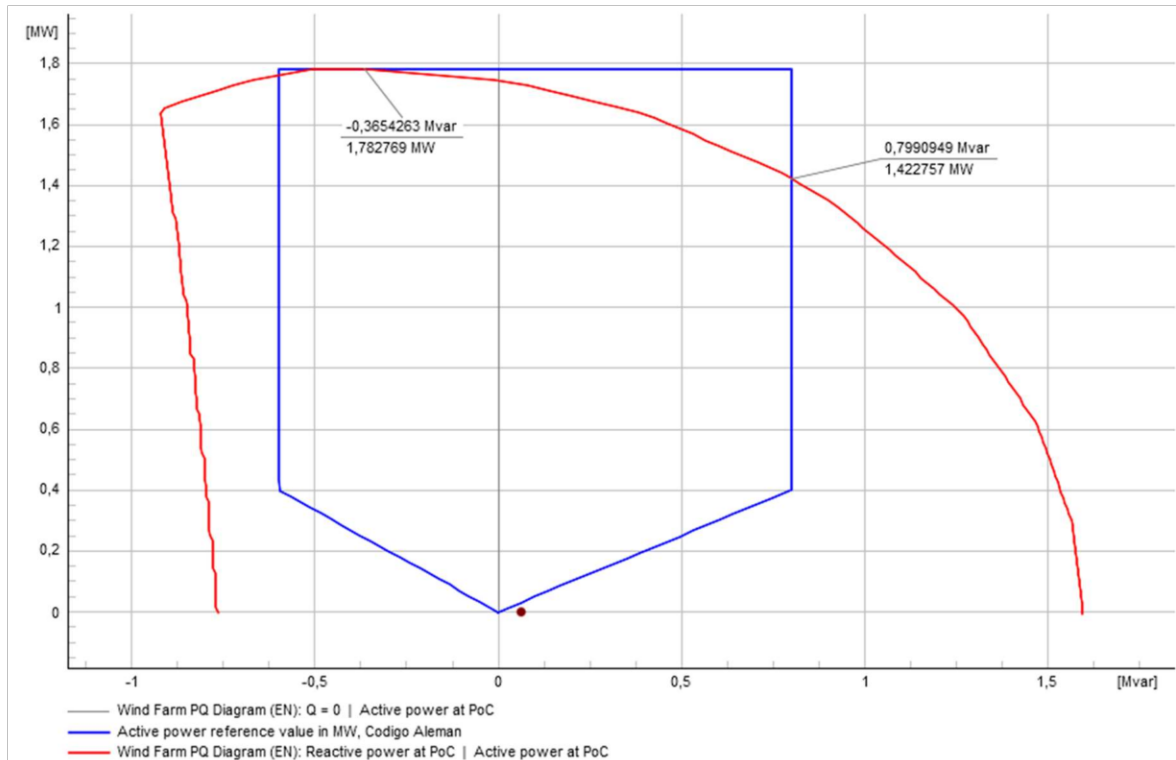


Figura 4.11 Comparación de la curva PQ del aerogenerador vs el código alemán para $s=0.1$ y $V=0.925$ p.u

Al igual que en el código alemán en el código español bajo estas condiciones de operación hace que el aerogenerador no cumpla debido al límite de la corriente de estator y rotor como se muestra en la Figura 4.12.

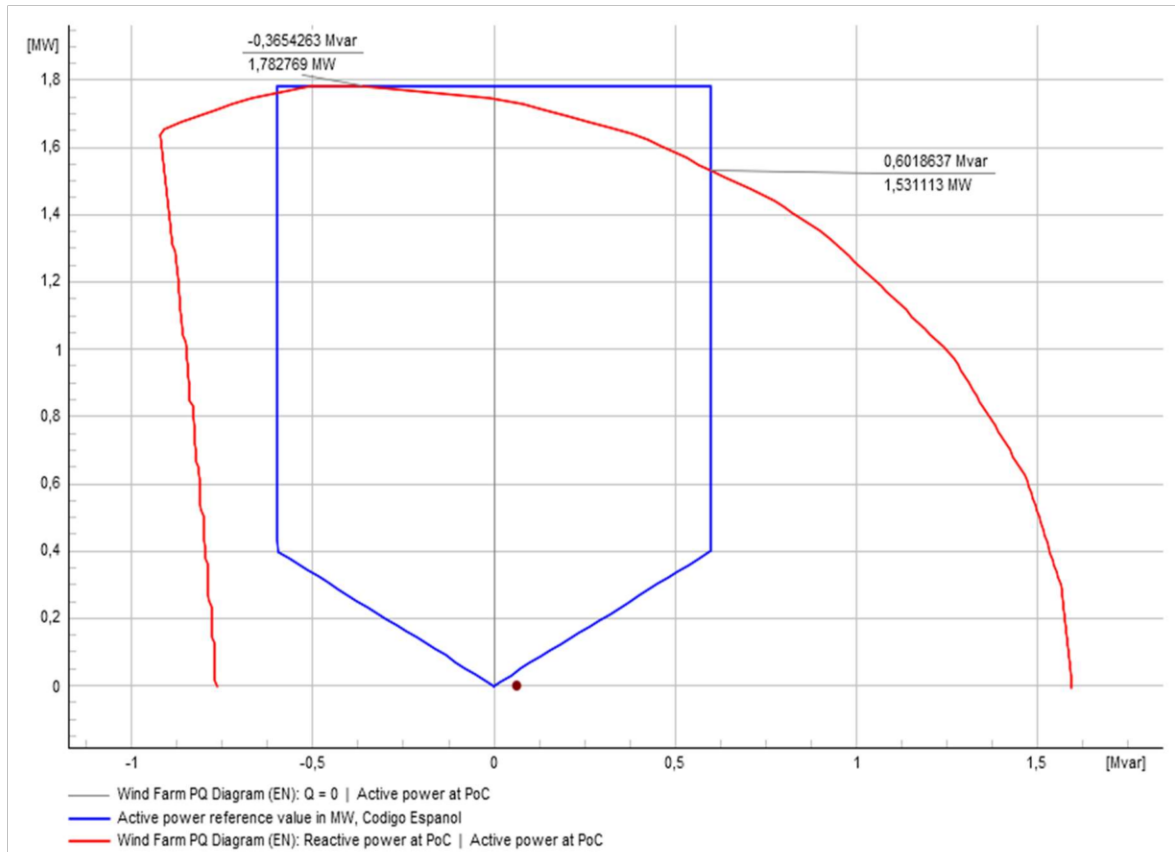


Figura 4.12 Comparación de la curva PQ del aerogenerador vs el código español para $s=0.1$ y $V=0.925$ p.u

4.3.4 Caso 4

Considerando la operación del aerogenerador se ingresó la curva PQ obtenida bajo condiciones de máximo viento, situación que establece un deslizamiento de -0.1 . En la Figura 4.13 se observa que la curva PQ en rojo del aerogenerador contiene completamente a la curva azul, es decir el aerogenerador cumple el código de red.

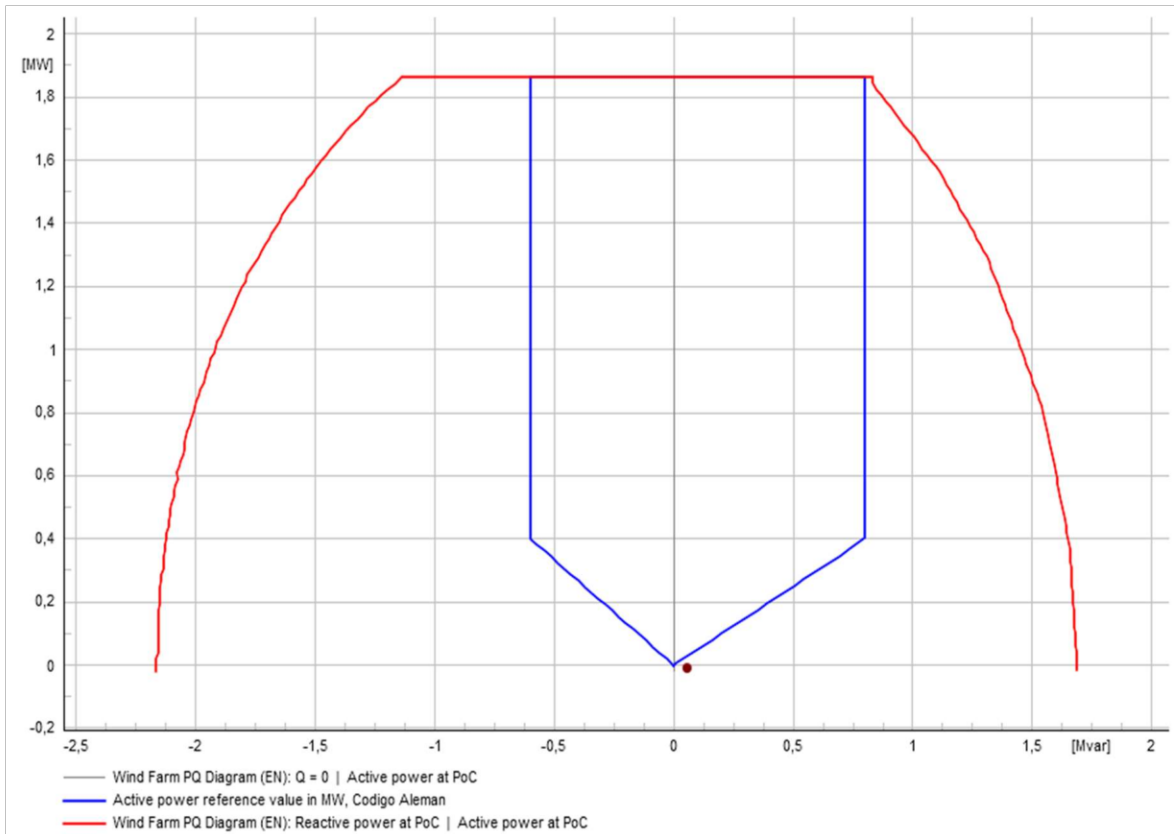


Figura 4.13 Comparación de la curva PQ del aerogenerador vs el código alemán para $s=-0.1$ y $V=1$ p.u

Como se mencionó anteriormente el código alemán es más estricto que el código español y como no hubo inconvenientes en el caso anterior, en este tampoco hay como se muestra en la Figura 4.14.

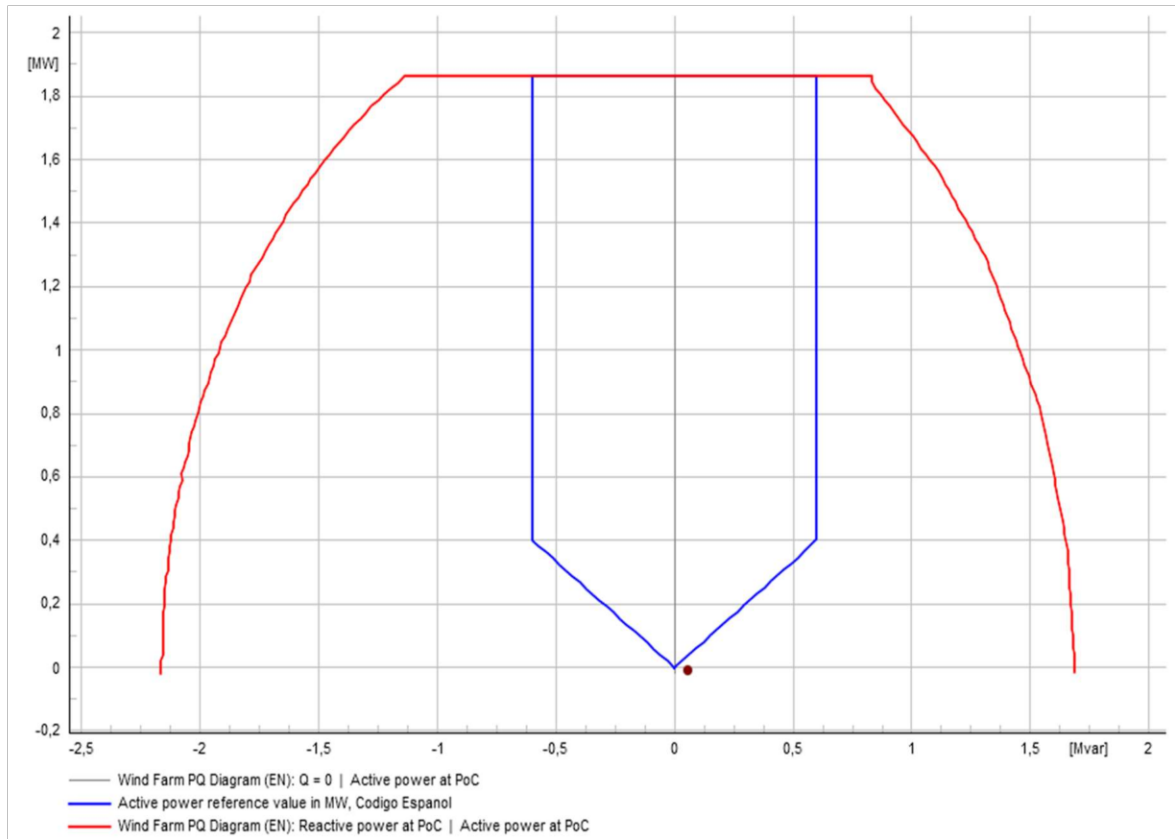


Figura 4.14 Comparación de la curva PQ del aerogenerador vs el código español para $s=-0.1$ y $V=1$ p.u

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Mediante un análisis de la literatura especializada sobre los límites de la curva PQ del aerogenerador DFIG se establecieron que los límites de corriente del estator, corriente del rotor, voltaje del rotor y potencia mecánica máxima que permiten obtener la curva P/Q, son los principales.
- Los softwares de ingeniería como PowerFactory cuentan con los modelos de aerogeneradores, mediante el cual es posible incluir los parámetros de este obtenidos mediante al procesamiento de variables como es el caso de la curva PQ del aerogenerador DFIG utilizado.
- Mediante las herramientas de análisis proporcionado por PowerFactory es posible obtener de manera gráfica las limitaciones de las variables de la curva PQ de un aerogenerador DFIG para diferentes condiciones operativas del sistema a que se conecte y disponibilidad del recurso.

- Con la curva PQ del aerogenerador es posible observar el cumplimiento de los requisitos establecidos por un sistema eléctrico respecto a las variables de potencia activa y reactiva en el punto de conexión de un aerogenerador. Situación que permite al ingeniero o al operador del sistema realizar análisis para incluir elementos eléctricos adicionales a fin de cumplir y garantizar una adecuada operación de los diferentes dispositivos y elementos conectados a la red.

5.2 RECOMENDACIONES

- Para el presente trabajo sólo se consideraron los límites de corriente del estator, corriente del rotor y voltaje del rotor para construir la curva, pero como se ha visto en la literatura especializada se tienen otros límites asociados a los convertidores y/o efectos de otros elementos del sistema eléctrico. Además, no se consideró el efecto del viento ni controles asociados a la dinámica del aerogenerador. Situación que mediante esta herramienta puede ser incluidos en futuros trabajos.
- Las zonas prohibidas de operación del aerogenerador se pueden solucionar a través de otros equipos de compensación de potencia reactiva que deberán instalarse dentro de la central para su normal operación, mismo que pueden ser dimensionados mediante el uso de esta herramienta con el desarrollo de módulos adicionales.
- La curva se obtuvo para un sólo generador en el punto de conexión, se puede realizar el análisis para un conjunto de aerogeneradores DFIG con la herramienta desarrollada para una granja eólica de mayor capacidad incluyendo la curva en cada uno de los aerogeneradores.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Martínez Maza, "Proyecto de parque eólico y estudios de conexión a red," Nov. 2018, doi: 10/29814.
- [2] J. Rosero, "Fuentes de Generación de Energía Eléctrica Convencional y Renovable a Nivel Mundial," *Rev. Politécnica*, vol. 33, no. 1, Art. no. 1, Feb. 2014, Accessed: Nov. 08, 2023. [Online]. Available: https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/217
- [3] "Renewable capacity statistics 2023." Accessed: Nov. 20, 2023. [Online]. Available: <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023>
- [4] "Revista Panorama Eléctrico – Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables." Accessed: Nov. 21, 2023. [Online]. Available: <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/revista-panorama-electrico/>

- [5] N. Gupta, "A review on the inclusion of wind generation in power system studies (Elsevier- Impact Factor- 10.556)," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 530–543, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.01.009.
- [6] P. Sørensen, B. Andresen, J. Fortmann, and P. Pourbeik, "Modular structure of wind turbine models in IEC 61400-27-1," in *2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, IEEE, 2013, pp. 1–5.
- [7] G. DlgSILENT GmbH, "Technical Reference 'IEC61400-27-1.'" 2016.
- [8] J. Tian, C. Su, and Z. Chen, "Reactive power capability of the wind turbine with doubly fed induction generator," in *IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, 2013, pp. 5312–5317.
- [9] P. Vijayan, "Utilizing reactive capability of doubly fed induction generators to enhance system voltage performance and withstand wind variability," Jan. 2010, Accessed: Nov. 13, 2023. [Online]. Available: <https://dr.lib.iastate.edu/handle/20.500.12876/25392>
- [10] M. Z. Sujod, I. Erlich, and S. Engelhardt, "Improving the Reactive Power Capability of the DFIG-Based Wind Turbine During Operation Around the Synchronous Speed," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 28, no. 3, pp. 736–745, Sep. 2013, doi: 10.1109/TEC.2013.2272975.
- [11] A. L. Bonache, "Modeling, simulation and validation of generic wind turbine models based on international guidelines," Universidad de Castilla-La Mancha, 2019.
- [12] A. Tapia, G. Tapia, J. X. Ostolaza, and J. R. Saenz, "Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 18, no. 2, pp. 194–204, 2003.
- [13] M. Kayikci and J. V. Milanovic, "Reactive power control strategies for DFIG-based plants," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 2, pp. 389–396, 2007.
- [14] T. Lund, P. Sørensen, and J. Eek, "Reactive power capability of a wind turbine with doubly fed induction generator," *Wind Energy Int. J. Prog. Appl. Wind Power Convers. Technol.*, vol. 10, no. 4, pp. 379–394, 2007.
- [15] A. Petersson, *Analysis, modeling and control of doubly-fed induction generators for wind turbines*. Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden), 2005.
- [16] H. Pulgar-Painemal, "Enforcement of current limits in DFIG-based wind turbine dynamic models through capability curve," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 10, no. 1, pp. 318–320, 2018.
- [17] C. F. Moyano and J. P. Lopes, "Using an OPF like approach to define the operational strategy of a wind park under a system operator control," in *2007 IEEE Lausanne Power Tech*, IEEE, 2007, pp. 651–656.
- [18] J. Devadason, "Modeling and analysis of variable reactive power limits of a Doubly Fed Induction Generator (DFIG) used in variable speed wind turbines".
- [19] M. Tsili and S. Papathanassiou, "A review of grid code technical requirements for wind farms," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 3, no. 3, pp. 308–332, 2009.
- [20] M. N. S. K. Shabbir, X. Liang, W. Li, and N. Khan, "Analytical approach-based reactive power capability curve for DFIG wind power plants," in *2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, IEEE, 2020, pp. 1–9.
- [21] J. D. Carroll Monstes, "Criterios técnicos para la conexión y operación de los generadores eólicos a gran escala al Sistema Interconectado Nacional (SIN) de Colombia," masterThesis, Escuela de Ingenierías, 2017. Accessed: Nov. 11, 2023. [Online]. Available: <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/4192>
- [22] I. M. de Alegría, J. Andreu, J. L. Martín, P. Ibanez, J. L. Villate, and H. Camblong, "Connection requirements for wind farms: A survey on technical requirements and regulation," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, no. 8, pp. 1858–1872, 2007.
- [23] A. F. O. Montañó, "La generación eólica ante las exigencias de los códigos de red: el caso de los aerogeneradores de velocidad fija," PhD Thesis, Universidade de Vigo, 2015. Accessed: Dec. 14, 2023. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=124551>

- [24] W.-C. Tsai, C.-M. Hong, C.-S. Tu, W.-M. Lin, and C.-H. Chen, "A review of modern wind power generation forecasting technologies," *Sustainability*, vol. 15, no. 14, p. 10757, 2023.
- [25] "Resolución N° ARCONEL-004/15 — Requerimientos Técnicos para la Conexión y Operación de Generadores Renovables No Convencionales a las Redes de Transmisión y Distribución. | FAOLEX." Accessed: Nov. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.fao.org/faolex/results/details/es/c/LEX-FAOC165985/>
- [26] G. DIgSILENT GmbH, "Technical Reference 'DIgSILENT DFIG WTG.'" 2016.
- [27] B. Singh and S. N. Singh, "Reactive capability limitations of doubly-fed induction generators," *Electr. Power Compon. Syst.*, vol. 37, no. 4, pp. 427–440, 2009.
- [28] G. DIgSILENT GmbH, "Technical Reference 'Induction Machine.'" 2016.
- [29] "REGLAMENTO (UE) 2016/ 631 DE LA COMISIÓN - de 14 de abril de 2016 - que establece un código de red sobre requisitos de conexión de generadores a la red".
- [30] G. DIgSILENT GmbH, "Technical Reference 'DFIG.'" 2016.
- [31] G. DIgSILENT GmbH, "User Manual." 2016.
- [32] G. DIgSILENT GmbH, "Wind Farm Application Example." 2016.

7 ANEXOS

ANEXO I:

Script de programación curva PQ

```
import numpy as np

import cmath

import matplotlib.pyplot as plt

# Funcion para obtener los puntos de la circunferencia

def obtener_puntos_circulo(radio, centro, num_puntos=200):

    # Crear un ángulo theta para generar puntos en la circunferencia

    theta = np.linspace(0, 2 * np.pi, num_puntos)

    # Obtener las coordenadas x, y del círculo

    x = radio * np.cos(theta) + centro[0]

    y = radio * np.sin(theta) + centro[1]

    return x, y

# Funcion para dibujar los puntos de la circunferencia

def dibujar_circulo(radio, centro, xlabel='Eje X', ylabel='Eje Y', titulo='Circunferencia'):

    # Obtener los puntos x, y de la circunferencia

    x, y = obtener_puntos_circulo(radio, centro)

    # Dibujar la circunferencia

    plt.figure(figsize=(6, 6))

    plt.plot(x, y, label='Circunferencia')
```

```

# Marcar el centro de la circunferencia con una etiqueta

plt.plot(centro[0], centro[1], 'ro') # Marcar el centro

plt.text(centro[0], centro[1], 'Centro', ha='right', va='bottom') # Etiqueta para el centro

# Configuración de ejes y título

plt.xlabel(xlabel)

plt.ylabel(ylabel)

plt.title(titulo)

plt.axis('equal') # Para mantener los ejes proporcionales

plt.legend() # Mostrar leyenda

plt.show() # Mostrar el gráfico

return x, y # Devolver los puntos x, y

# Datos Generador DFIG

Sn=2210; #Potencia Aparente Nominal kVA

fp=0.9112211; #factor de potencia

Pn=Sn*fp; #Potencia Activa Nominal kW

#Datos Generador de Induccion

nwin=4; # numero de vueltas devanado

Rs=0.0059; #pu Resistencia estator

```

```

Xs=0.1107; #pu Reactancia estator
Xm=4.7351; # pu Reactancia principal
Rr=0.0066; #pu Resistencia Rotor (referida al estator)
Xr=0.1193; #pu Reactancia Rotor (referida al estator)
nr=0.9869102 #eficiencia generador induccion
Pmech_nom=100*Pn*nr/100; # Potencia Mecanica Nominal kW #1987.44

s=-0.2 #Deslizamiento (Curva PQ depende directamente del deslizamiento

# Calculo Impedancias Rotor,Estator y Magnetizacion
Zr=complex(Rr/s,Xr)
Zs=complex(Rs,Xs)
Zm=complex(0,Xm)

###Limite corriente rotor
Vs=1;#pu
Ir_nom=1; #pu
tetha_Ir=0; #rad
Ir=cmath.rect(Ir_nom,tetha_Ir) #I rotor

# Potencia estator Limite Ir
rSsIr=abs(Ir)*abs(Vs)*abs(Zm/(Zs+Zm)) #radio potencia aparente estator limite Ir
aux=(1/(Zs+Zm))
cSsIr=-abs(Vs)*abs(Vs)*aux.conjugate(); #centro potencia aparente estator limite Ir

```

```

centro_circulo = (cSslr.real,cSslr.imag) # Coordenadas (x, y) del centro
dibujar_circulo(rSslr, centro_circulo, xlabel='Ps', ylabel='Qs',titulo='Potencia Estator')
Ps,Qs=obtener_puntos_circulo(rSslr,centro_circulo)

# Potencia rotor

rSrlr=abs(lr)*abs(Vs)*abs(s)*abs(Zm/(Zs+Zm)) #radio potencia aparente rotor limite lr
aux2=((Zr+Zs)*Zm+(Zr*Zs))/(Zs+Zm)
cSrlr=-abs(lr)*abs(lr)*s*aux2 #radio potencia aparente rotor limite lr
centro_circulo2 = (cSrlr.real,cSrlr.imag) # Coordenadas (x, y) del centro
dibujar_circulo(rSrlr, centro_circulo2,xlabel='Pr', ylabel='Qr',titulo='Potencia Rotor')
Pr,Qr=obtener_puntos_circulo(rSrlr,centro_circulo2) #Puntos potencia rotor limite lr

# Potencia total Limite lr

Ptot_lr,Qtot_lr=Ps*(1-s),Qs

# Graficando Ptot vs Qtot Limite lr
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.scatter(Ptot_lr, Qtot_lr, label='Ptot vs Qtot', color='green')
plt.xlabel('Ptot')
plt.ylabel('Qtot')
plt.title('Limite Corriente del Rotor')
plt.legend()
plt.grid(True)

```

```

plt.xlim(-0.5, 1.1) # Establecer el límite inferior en el eje x

plt.ylim(-1.4, 0.85)

plt.show()

##Limite Voltaje del Rotor

Vs=1; #p.u

Vr=1/nwin; #p.u

tetha_Vr=0; #rad

Vr=cmath.rect(Vr,tetha_Vr) #I rotor

# Potencia Estator Limite Vr

rSsVr=abs(Vr/s)*abs(Vs)*abs((Zm)/(((Zr+Zs)*Zm)+(Zs*Zr))) #radio potencia aparente
estator limite Vr

aux3=(Zr+Zm)/((Zr+Zs)*Zm+(Zs*Zr))

cSsVr=-abs(Vs)*abs(Vs)*aux3.conjugate() #centro potencia aparente estator limite Vr

centro_circulo3 = (cSsVr.real,cSsVr.imag) # Coordenadas (x, y) del centro

dibujar_circulo(rSsVr, centro_circulo3, xlabel='Ps', ylabel='Qs',titulo='Potencia Estator')

Ps_Vr,Qs_Vr=obtener_puntos_circulo(rSsVr,centro_circulo3,575) #Puntos potencia
estator limite Vr

# Potencia total Limite Vr

Ptot_Vr,Qtot_Vr=Ps_Vr*(1-s),Qs_Vr

# Graficando Ptot vs Qtot Limite Vr

```

```

plt.figure(figsize=(8, 6))

plt.scatter(Ptot_Vr, Qtot_Vr, label='Ptot vs Qtot', color='green')

plt.xlabel('Ptot')

plt.ylabel('Qtot')

plt.title('Limite Voltaje del Rotor')

plt.legend()

plt.grid(True)

plt.xlim(0.2, 15) # Establecer el límite inferior en el eje x

plt.ylim(-20,7)

plt.show()

## Limite Corriente del Estator

# Potencia Estator Limite Is

Vs=1 #p.u

Is=1 #p.u

rSIs=abs(Vs)*abs(Is) #radio potencia aparente estator limite Is

centro_circulo4 = (0,0) # Coordenadas (x, y) del centro

dibujar_circulo(rSIs, centro_circulo4, xlabel='Ps', ylabel='Qs',titulo='Potencia Estator')

Ps_Is,Qs_Is=obtener_puntos_circulo(rSIs,centro_circulo4) #Puntos potencia aparente
estator limite Is

# Potencia total Limite Is

Ptot_Is,Qtot_Is=Ps_Is*(1-s),Qs_Is

# Graficando Ptot vs Qtot Limite Vr

```

```

plt.figure(figsize=(8, 6))

plt.scatter(Ptot_Is, Qtot_Is, label='Ptot vs Qtot', color='green')

plt.xlabel('Ptot')

plt.ylabel('Qtot')

plt.title('Limite Corriente del Estator')

plt.legend()

plt.grid(True)

plt.xlim(-0.5, 1.2) # Establecer el límite inferior en el eje x

plt.ylim(-1.2,1)

plt.show()

## Interseccion Curvas

# Crear un solo gráfico con las tres gráficas combinadas

plt.figure(figsize=(8, 6))

# Graficar la primera métrica: Limite Corriente del Rotor

plt.scatter(Ptot_Ir, Qtot_Ir, label='Limite Corriente del Rotor', color='black')

# Graficar la segunda métrica: Limite Voltaje del Rotor

plt.scatter(Ptot_Vr, Qtot_Vr, label='Limite Voltaje del Rotor', color='red')

# Graficar la tercera métrica: Limite Corriente del Estator

plt.scatter(Ptot_Is, Qtot_Is, label='Limite Corriente del Estator', color='blue')

# Configurar ejes, título y leyenda

```

```

plt.xlabel('Ptot')
plt.ylabel('Qtot')
plt.title(f'Curva de Capacidad DFIG s={s}')
plt.legend()
plt.grid(True)

# Establecer límites de los ejes basados en los datos de las métricas individuales
xmin = min(min(Ptot_lr), min(Ptot_Vr), min(Ptot_Is))
xmax = max(max(Ptot_lr), max(Ptot_Vr), max(Ptot_Is))
ymin = min(min(Qtot_lr), min(Qtot_Vr), min(Qtot_Is))
ymax = max(max(Qtot_lr), max(Qtot_Vr), max(Qtot_Is))

plt.xlim(0, 1.5)
plt.ylim(-1.5, 3)

plt.show()

# Unificar los datos en listas de tuplas (X, Y)
curve_lr = [(x, y) for x, y in zip(Ptot_lr, Qtot_lr) if x >= 0]
curve_Vr = [(x, y) for x, y in zip(Ptot_Vr, Qtot_Vr) if 0 <= x < 1.2 ]
curve_Is = [(x, y) for x, y in zip(Ptot_Is, Qtot_Is) if x >= 0]

# Ordenar los puntos de cada curva en función de sus valores de X

```



```

curve_lr.sort(key=lambda point: point[0])
curve_Vr.sort(key=lambda point: point[0])
curve_Is.sort(key=lambda point: point[0])

# Obtener las coordenadas x e y de cada curva
X_curve_lr = [point[0] for point in curve_lr]
Y_curve_lr = [point[1] for point in curve_lr]

X_curve_Vr = [point[0] for point in curve_Vr]
Y_curve_Vr = [point[1] for point in curve_Vr]

X_curve_Is = [point[0] for point in curve_Is]
Y_curve_Is = [point[1] for point in curve_Is]

# Graficar las curvas como scatter plots
plt.figure(figsize=(8, 6))

plt.scatter(X_curve_lr, Y_curve_lr, label='Limite lr', marker='.',color='black')
plt.scatter(X_curve_Vr, Y_curve_Vr, label='Limite Vr', marker='.',color='red')
plt.scatter(X_curve_Is, Y_curve_Is, label='Limite Is', marker='.',color='blue')

# Potencia Maxima
Pmax = 0.95*Pmech_nom/Sn; #Limite Potencia Mecanica Maxima

# Obtener los límites actuales del eje y

```