



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

# CONTROL DE LA TENSIÓN EN UNA RED CON GENERACIÓN EÓLICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
ELECTRICISTA

PABLO ANTONIO PALMA VILLAGRÁN

PROFESOR GUÍA:  
OSCAR MOYA ARAVENA

MIEBROS DE LA COMISIÓN:  
DORIS SAEZ HUEICHAPAN  
CRISTIAN HERMANSEN REBOLLEDO

SANTIAGO DE CHILE  
MAYO 2010

## CONTROL DE LA TENSION EN UNA RED CON GENERACION EOLICA

La integración masiva de tecnologías no convencionales de generación implica un gran desafío en el manejo técnico de las redes eléctricas, ya que no solo aportan en la diversificación de la matriz energética, sino que además obligan a un rediseño tanto en los procedimientos de control, operación y en la infraestructura del sistema eléctrico, puesto que se deben mantener los estándares de calidad y seguridad de servicio en los niveles establecidos por la norma.

Dentro de los recursos energéticos no convencionales la energía eólica es una de las tecnologías con mayor proyección de penetración en los sistemas eléctricos de potencia, particularmente en el SIC se están evaluando una importante cantidad de proyectos dadas las favorables condiciones geográficas de Chile. Dados estos posibles escenarios de penetración eólica es necesario evaluar la factibilidad técnica de la instalación masiva de aerogeneradores, dentro de este contexto este trabajo plantea un diseño alternativo para el control de tensión de las posibles barras de generación eólica que pueden implementarse en el SIC, el principal objetivo de este trabajo es que el método propuesto sea una alternativa a los actuales procedimientos de regulación de voltaje en redes con generación eólica (regulación local en los parques eólicos, SVC's, etc.).

Este sistema de control propone el uso conjunto de la capacidad de regulación de tensión que tienen los generadores convencionales (unidades hidráulicas y térmicas) presentes en un sistema eléctrico con el propósito de disminuir así el uso de equipos de regulación de voltaje local en los parques eólicos, maximizando la utilización de los recursos de la red. El planteamiento teórico de esta técnica corresponde a un sistema de optimización que entrega como resultado el aporte necesario que deben realizar los generadores convencionales para corregir el voltaje en las barras de generación eólica. Este método se implementó en tres zonas del SIC las cuales presentan distintas características en su topología y corresponden a áreas geográficas con potencial eólico.

Las configuraciones obtenidas por este método para los tres casos de estudio fueron simuladas en el modelo estático disponible del SIC, los resultados arrojados por los flujos de potencia son satisfactorios, ya que los niveles de tensión logrados son muy cercanos al valor nominal para todas las barras de generación eólica implementadas, por lo tanto el sistema de control propuesto satisface los principales objetivos planteados.

Como trabajo futuro se proponen estudios de comportamiento dinámico de un sistema eléctrico que tenga implementado este método de control de tensión; también establecer un procedimiento que permita determinar la configuración del sistema de control de acuerdo a los requerimientos de la operación de la red eléctrica; y por último encontrar una forma de asignar el valor que debiera tener este método de control visto como un servicio complementario.

## **Agradecimientos.**

Primero que todo quiero expresar mis más profundos agradecimientos a mis padres Alicia y Domingo, quienes son los principales responsables de que yo haya podido concretar mi carrera universitaria, no me imagino haberlo logrado sin su apoyo, es por eso que a ellos dedico este trabajo.

También quisiera agradecer a mi profesor guía Oscar Moya, por su gran disposición en la orientación y colaboración en el desarrollo de esta memoria.

Por último quiero saludar a todos mis amigos de la universidad quienes, a pesar de no haber realizado ningún aporte significativo en este trabajo, estuvieron presentes en todos los momentos que hacen inolvidable la vida universitaria.

# Índice General.

Agradecimientos.....	iii
Índice General. ....	iv
Índice de Ilustraciones.....	vi
Índice de Tablas.....	vii
Capítulo 1 .....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos Generales. ....	1
1.3. Objetivos Específicos. ....	2
1.4. Organización del Trabajo.....	2
Capítulo 2 .....	3
2.1. Tecnologías de implementación de generadores eólicos.....	3
2.1.1. Generadores Asíncronos tipo “Jaula de Ardilla”.....	3
2.1.2. Generadores Asíncronos con rotor bobinado. ....	4
2.1.3. Generadores Sincrónicos.....	6
2.2. Modelo de generador asincrónico de velocidad fija. ....	8
2.3. Modelo mecánico del generador.....	10
2.4. Problemas de estabilidad del generador de velocidad fija.....	12
2.5. Límites aceptados para la Regulación de Tensión. ....	12
2.6. Variaciones lentas tensión y pérdidas en la red (análisis estático). ....	14
2.7. Power Quality. ....	15
2.7.1. Características de calidad de suministro de aerogeneradores.....	16
2.7.2. Valores nominales: .....	16
2.7.3. Potencia máxima permitida.....	16
2.7.4. Potencia máxima medida. ....	16
2.7.5. Potencia Reactiva. ....	17
2.7.6. Coeficiente de “flicker” (parpadeo).....	17
2.7.7. Número máximo de operaciones de conmutación. ....	17
2.7.8. Corrientes armónicas.....	17
2.8. Panificación eólica en Chile. ....	18
Capítulo 3 .....	21
3.1. Modelo Base.....	21

3.2.	Comportamiento del modelo base.....	22
3.3.	Implementación unidades eólicas.....	23
3.4.	Flujos de los nuevos sistemas y acciones de control de tensión.....	24
3.4.1.	Quillota 220.....	26
3.4.2.	Cardones 220.....	31
3.4.3.	Valdivia 220.....	36
Capítulo 4	.....	41
4.1.	Modelo.....	41
4.1.1.	La función objetivo.....	41
4.1.2.	Restricciones.....	41
Capítulo 5	.....	43
5.1.	Metodología.....	43
5.2.	Cardones220.....	44
5.2.1.	Funciones de Influencia.....	45
5.2.2.	Restricciones.....	47
5.2.3.	Sistema optimización.....	49
5.2.4.	Flujos de potencia.....	50
5.3.	Quillota220.....	52
5.3.1.	Funciones de Influencia.....	53
5.3.2.	Restricciones.....	56
5.3.3.	Sistema optimización.....	57
5.3.4.	Flujos de potencia.....	59
5.4.	Valdivia220.....	60
5.4.1.	Funciones de influencia.....	61
5.4.2.	Restricciones.....	63
5.4.3.	Sistema optimización.....	64
5.4.4.	Flujos de potencia.....	65
Capítulo 6	.....	68
6.1.	Control-Monitoreo.....	69
6.2.	Anormalidades y Excepciones.....	70
6.3.	Plataforma de desarrollo.....	72
Capítulo 7	.....	74
7.1.	Conclusiones.....	74

7.2. Trabajo Futuro.....	75
Referencias.....	76
Anexos.....	77
A. Gráficos de perfil de tensiones y reactivos.....	77
A.1. Resultados Cardones.....	77
A.2. Resultados Valdivia.....	79
A.3. Resultados Quillota.....	80
B. Resultados flujos de potencia.....	82
B.1. Resultados Cardones.....	82
B.2. Resultados Quillota.....	86
B.3. Resultados Valdivia.....	90
B.4 Implementación de la optimización.....	95

## Índice de Ilustraciones.

Ilustración 2-1 "Generador de velocidad fija".....	4
Ilustración 2-2 "Generador de velocidad variable".....	4
Ilustración 2-3 "Generador con deslizamiento dinámico".....	5
Ilustración 2-4 "Generador doblemente alimentado".....	5
Ilustración 2-5 "Generador sincrónico de velocidad variable".....	6
Ilustración 2-6 "modelo máquina de inducción".....	8
Ilustración 2-7 "Modelo dinámico del eje de la turbina".....	11
Ilustración 2-8 "Modelo de inyección de energía eólica".....	14
Ilustración 2-9 "Modelo de inyección de energía eólica como GD".....	15
Ilustración 3-1 "Esquemático del SIC".....	21
Ilustración 3-2 "Sub-sistema eólico".....	23
Ilustración 3-3 "Subsistema eólico Quillota220".....	26
Ilustración 3-4 "Sub-sistema eólico Cardones220".....	31
Ilustración 3-5 "Sub-sistema eólico Valdivia220".....	36
Ilustración 5-1 "Sub-sistema Cardones220".....	44
Ilustración 5-2 "Función de influencia f1 Cardones".....	46
Ilustración 5-3 "Función de influencia f2 Cardones".....	46
Ilustración 5-4 "Función de influencia h1 Cardones".....	47
Ilustración 5-5 "Tensión en función de reactivos absorbidos Cardones".....	48
Ilustración 5-6 "Perfil de tensiones para distintas combinaciones de pesos".....	50
Ilustración 5-7 "Perfil de tensiones barras controladoras Cardones".....	51
Ilustración 5-8 "tensión en barra controlada Cardones".....	51

Ilustración 5-9 "Sub-sistema Quillota 220"	52
Ilustración 5-10 Función de influencia f1 Quillota"	54
Ilustración 5-11 "Función de influencia f2 Quillota"	54
Ilustración 5-12 "Función de influencia f3 Quillota"	55
Ilustración 5-13 "Función de influencia f4 Quillota"	55
Ilustración 5-14 "Tensión en función de reactivos absorbidos Quillota"	57
Ilustración 5-15 "perfil de tensiones para distintas combinaciones de pesos Quillota"	58
Ilustración 5-16 Perfil de tensiones barras controladoras Quillota"	59
Ilustración 5-17 "Tensión en barra controlada Quillota"	60
Ilustración 5-18 "Sub-sistema Valdivia220"	60
Ilustración 5-19 "Función de influencia f1 Valdivia"	62
Ilustración 5-20 "Función de influencia f2 Valdivia"	62
Ilustración 5-21 "Función de influencia h1 Valdivia"	63
Ilustración 5-22 "Tensión en función de reactivos absorbidos Valdivia"	64
Ilustración 5-23 "perfil de tensiones para distintas combinaciones de pesos Valdivia"	65
Ilustración 5-24 "perfil de tensiones barra controladoras Valdivia"	66
Ilustración 5-25 "Tensión en barra controlada Valdivia"	67
Ilustración 6-1 "Esquema sistema de control"	68
Ilustración 6-2 "Diagrama de flujo"	69
Ilustración 6-3 "Esquema SCADA"	73
Ilustración A-1 "Cardones12_a1=10_a2=10_a3=40-160"	77
Ilustración A-2 "Cardones12_a1=10_a2=10_a3=200-320"	78
Ilustración A-3 "Cardones12_a1=10_a2=10_a3=360-480"	78
Ilustración A-4 "Valdivia12_a1=40-160_a2=10_a3=10"	79
Ilustración A-5 "Valdivia12_a1=200-320_a2=10_a3=10"	79
Ilustración A-6 "Valdivia12_a1=360-480_a2=10_a3=10"	80
Ilustración A-7 "Quillota12_a1=5-20_a2=0.05_a3=0.04_a3=0.04"	80
Ilustración A-8 "Quillota12_a1=25-40_a2=0.05_a3=0.04_a3=0.04"	81
Ilustración A-9 "Quillota12_a1=45-60_a2=0.05_a3=0.04_a3=0.04"	81

## Índice de Tablas.

Tabla 2-1 "Nomenclatura aerogeneradores"	6
Tabla 2-2 "Límites exigidos por la NTSyCS"	13
Tabla 2-3 "Potenciales Brutos, estimación al 2025"	18
Tabla 2-4 "Potencia instalable SIC [MW] 2008-2025"	18
Tabla 2-5 "Resumen generación anual SIC 2009"	19
Tabla 2-6 "Proyectos eólicos recomendados por la CNE"	19
Tabla 3-1 "Características del modelo"	21
Tabla 3-2 "Flujo a modelo base"	22
Tabla 3-3 "Estadísticas de generación"	23

Tabla 3-4 "Características elementos del sub-sistema eólico"	24
Tabla 3-5 "Flujo de potencia con unidades eólicas desactivadas"	24
Tabla 3-6 "Estadísticas de generación del SIC con unidades eólicas desactivadas"	26
Tabla 3-7 "Flujo de potencia caso base modificado Quillota 220"	27
Tabla 3-8 "Estadísticas generación caso modificado Quillota 220"	28
Tabla 3-9 "Consigna de tensiones Configuración 1 Quillota220"	28
Tabla 3-10 "Flujo de potencia Configuración 1 Quillota220"	29
Tabla 3-11 "Consignas de tensión Configuración 2 Quillota 220"	30
Tabla 3-12 "Flujo de potencia Configuración 2 Quillota 220"	30
Tabla 3-13 "Flujo de potencia caso base modificado Cardones 220"	32
Tabla 3-14 "Consignas de tensión Configuración1 Cardones 220"	33
Tabla 3-15 "Flujo de potencia Configuración 1 Cardones 220"	33
Tabla 3-16 "Consignas de tensión Configuración 2 Cardones220"	34
Tabla 3-17 "Flujos de potencia Configuración 2 Cardones 220"	34
Tabla 3-18 "Flujo de potencia caso base modificado Valdivia220"	36
Tabla 3-19 "Consignas de tensión Configuración 1 Valdivia220"	37
Tabla 3-20 "Flujo de potencia Configuración 1 Valdivia220"	38
Tabla 3-21 "Consignas de tensión Configuración 2 Valdivia220"	39
Tabla 3-22 "Flujo de potencia Configuración 2 Valdivia220"	39
Tabla 5-1 "Características barras controladoras"	44
Tabla 5-2 "Datos barra controlada"	44
Tabla 5-3 "Datos funciones de influencia Cardones 220"	45
Tabla 5-4 "Datos función de influencia h1 Cardones"	46
Tabla 5-5 "Restricciones Cardones"	47
Tabla 5-6 "Tensiones en función de reactivos absorbidos Cardones"	48
Tabla 5-7 "Características barras controladoras Quillota"	52
Tabla 5-8 "Datos barra controlada Quillota"	53
Tabla 5-9 "Datos funciones de influencia Quillota"	53
Tabla 5-10 "Restricciones Quillota"	56
Tabla 5-11 "Tensiones en función de reactivos absorbidos Quillota"	56
Tabla 5-12 "Características barras controladoras Valdivia"	61
Tabla 5-13 "Datos barra controlada"	61
Tabla 5-14 "Datos funciones de influencia Valdivia"	61
Tabla 5-15 "Datos función de influencia h1 Valdivia"	62
Tabla 5-16 "Restricciones Valdivia"	63
Tabla 5-17 "Tensiones en función de reactivos absorbidos Valdivia"	63
Tabla B-1 "Cardones12_a1=10_a2=10_a3=40"	82
Tabla B-2 "Cardones12_a1=10_a2=10_a3=80"	82
Tabla B-3 "Cardones12_a1=10_a2=10_a3=120"	83
Tabla B-4 "Cardones12_a1=10_a2=10_a3=160"	83
Tabla B-5 "Cardones12_a1=10_a2=10_a3=200"	83
Tabla B-6 "Cardones12_a1=10_a2=10_a3=240"	84
Tabla B-7 "Cardones12_a1=10_a2=10_a3=280"	84



Tabla B-8 “Cardones12_a1=10_a2=10_a3=320” .....	84
Tabla B-9 “Cardones12_a1=10_a2=10_a3=360” .....	85
Tabla B-10 “Cardones12_a1=10_a2=10_a3=400” .....	85
Tabla B-11 “Cardones12_a1=10_a2=10_a3=440” .....	85
Tabla B-12 “Cardones12_a1=10_a2=10_a3=480” .....	86
Tabla B-13 “Quillota12_a1=5_a2=0.05_a3=0.04_a3=0.04” .....	86
Tabla B-14 “Quillota12_a1=10_a2=0.05_a3=0.04_a3=0.04” .....	86
Tabla B-15 “Quillota12_a1=15_a2=0.05_a3=0.04_a3=0.04” .....	87
Tabla B-16 “Quillota12_a1=20_a2=0.05_a3=0.04_a3=0.04” .....	87
Tabla B-17 “Quillota12_a1=25_a2=0.05_a3=0.04_a3=0.04” .....	87
Tabla B-18 “Quillota12_a1=30_a2=0.05_a3=0.04_a3=0.04” .....	88
Tabla B-19 “Quillota12_a1=35_a2=0.05_a3=0.04_a3=0.04” .....	88
Tabla B-20 “Quillota12_a1=40_a2=0.05_a3=0.04_a3=0.04” .....	88
Tabla B-21 “Quillota12_a1=45_a2=0.05_a3=0.04_a3=0.04” .....	89
Tabla B-22 “Quillota12_a1=50_a2=0.05_a3=0.04_a3=0.04” .....	89
Tabla B-23 “Quillota12_a1=55_a2=0.05_a3=0.04_a3=0.04” .....	89
Tabla B-24 “Quillota12_a1=60_a2=0.05_a3=0.04_a3=0.04” .....	90
Tabla B-25 “Valdivia12_a1=40_a2=10_a3=10” .....	90
Tabla B-26 “Valdivia12_a1=80_a2=10_a3=10” .....	90
Tabla B-27 “Valdivia12_a1=120_a2=10_a3=10” .....	91
Tabla B-28 “Valdivia12_a1=160_a2=10_a3=10” .....	91
Tabla B-29 “Valdivia12_a1=200_a2=10_a3=10” .....	91
Tabla B-30 “Valdivia12_a1=240_a2=10_a3=10” .....	92
Tabla B-31 “Valdivia12_a1=280_a2=10_a3=10” .....	92
Tabla B-32 “Valdivia12_a1=320_a2=10_a3=10” .....	92
Tabla B-33 “Valdivia12_a1=360_a2=10_a3=10” .....	93
Tabla B-34 “Valdivia12_a1=400_a2=10_a3=10” .....	93
Tabla B-35 “Valdivia12_a1=440_a2=10_a3=10” .....	93
Tabla B-36 “Valdivia12_a1=480_a2=10_a3=10” .....	94

# Capítulo 1

## Introducción.

### 1.1.Motivación.

Durante la última década el abastecimiento energético del país se ha visto envuelto en complejos escenarios: periodos de sequía que afectan las reservas hídricas de los grandes embalses, alzas en el precio del petróleo, cortes de suministro del gas natural, etc. Todos estos hechos sumados al incremento sostenido de la demanda de energía eléctrica durante los últimos 25 años (a una tasa de 5,8% anual) [15] han puesto en evidencia la vulnerabilidad energética del país, que ha desarrollado una matriz energética basada en fuentes convencionales de generación eléctrica (combustibles fósiles e hidroelectricidad). Estas situaciones han generado incertidumbre en el suministro eléctrico lo cual ha repercutido en un aumento en el precio de la electricidad, es por esto que en los últimos años ha aumentado el interés en los medios no convencionales de generación (ERNC) en especial en los proyectos eólicos ya que con los precios de energía en aumento estas tecnologías se vuelven competitivas, además por parte del Estado se están realizando los esfuerzos para obligar e incentivar aún más a las empresas generadoras en el uso de ERNC con el fin de diversificar la matriz energética y disminuir un poco la dependencia en el suministro de energéticos primarios.

El incremento en la penetración de la energía eólica en el SIC no solo influye en la diversificación de la matriz energética, sino que además implica nuevos requerimientos técnicos en la red. Los efectos que puede producir una entrada masiva de aerogeneradores varía de acuerdo a la naturaleza del viento en las zonas escogidas, la tecnología de generadores utilizada y la topología de la red, específicamente en los nudos cercanos a las zonas de inyección eólica [17][18], por lo que frente a un contexto de penetración masiva de generación eólica es necesario efectuar los estudios de factibilidad técnicos que aseguren el correcto funcionamiento del sistema eléctrico frente a estos nuevos escenarios.

En respuesta al incremento y al alto interés en las energías renovables no convencionales, en especial en la generación eólica, se plantea como tema de memoria un estudio acerca del control de la tensión en una red donde existen zonas con altos niveles de penetración eólica, específicamente la red escogida corresponde a un modelo simplificado del SIC.

### 1.2.Objetivos Generales.

El objetivo general de este trabajo es proponer una forma alternativa en el control de tensión en los sistemas eléctricos de potencia, específicamente se busca atenuar el efecto que producen los aerogeneradores sobre el voltaje de los nudos del sistema, para esto se pretende maximizar el uso de los recursos existentes en la red utilizando la capacidad de regulación de voltaje de los generadores

convencionales presentes, efectuando entre éstos un esfuerzo conjunto en el control de tensión, evitando así el uso excesivo de equipos locales de regulación de voltaje en las granjas eólicas.

### **1.3.Objetivos Específicos.**

Los objetivos específicos de este trabajo son:

- Construir o adecuar un modelo computacional que represente al SIC para la realización de estudios estáticos de flujos de potencia.
- Identificar los nudos que representen zonas geográficas con posible potencial eólico y estudiar el comportamiento de estas zonas frente a la presencia de aerogeneradores.
- Plantear un modelo teórico de control de tensión que frente a distintos escenarios de generación eólica entregue las configuraciones necesarias a efectuar sobre los generadores convencionales.
- Probar mediante flujos de potencia las configuraciones que arroja el modelo teórico y verificar la efectividad de los resultados.

### **1.4.Organización del Trabajo.**

Esta memoria consta de 7 capítulos en los cuales se aborda el desarrollo y la implementación del modelo de control de tensión propuesto. En el capítulo 2 se elabora un breve marco teórico que explica las principales características de las tecnologías de aerogeneradores existentes y sus efectos sobre las redes eléctricas; en el capítulo 3 se expone acerca del modelo estático del SIC que se utilizará para la implementación del modelo de control; en los capítulos 4 y 5 se presenta el desarrollo teórico y se efectúan los casos de estudio en el modelo del SIC respectivamente; en el capítulo 6 se comentan los alcances del sistema de control desarrollado y las consideraciones necesarias a tener en cuenta en una eventual implementación; por último en el capítulo 7 se desarrollan las conclusiones de la memoria y se plantean las direcciones que deberían tomar posibles trabajos futuros.

# Capítulo 2

## Modelos de parques de generación eólica en cuanto a efectos sobre P y Q.

Para la implementación y estudio de técnicas de control de tensión en sistemas con alta penetración de energía eólica es necesario primero conocer las distintas alternativas existentes en cuanto a tecnología de generadores eólicos, luego elegir la opción tecnológica más viable en una posible integración masiva en el sistema (en este caso en particular el SIC), una vez decidido esto se procede al moldeamiento matemático de los generadores que permitirá la implementación computacional necesaria para evaluar los distintos casos de estudio que se plantean en esta memoria.

### 2.1. Tecnologías de implementación de generadores eólicos.

En la actualidad existen distintas formas de realizar la transformación electromecánica de la energía proveniente del viento, a continuación se presentan los principales esquemas de implementación de estas tecnologías [1][3][4].

#### 2.1.1. Generadores Asíncronos tipo “Jaula de Ardilla”.

- Acoplados directamente a la red (velocidad fija).

Corresponde simplemente a unidades que son conectadas directamente a la red, la velocidad de operación de estos generadores queda determinada por la frecuencia del sistema y por la configuración de la “caja amplificadora” la cual acopla las aspas de la turbina eólica con el eje del generador. Al utilizar rotores del tipo jaula de ardilla consumen constantemente un alto nivel de reactivos necesarios para la magnetización del rotor. La principal desventaja de estos generadores es que son sensibles a las oscilaciones y perturbaciones mecánicas producto de los cambios de viento afectando directamente al flujo de energía transmitida hacia al sistema.

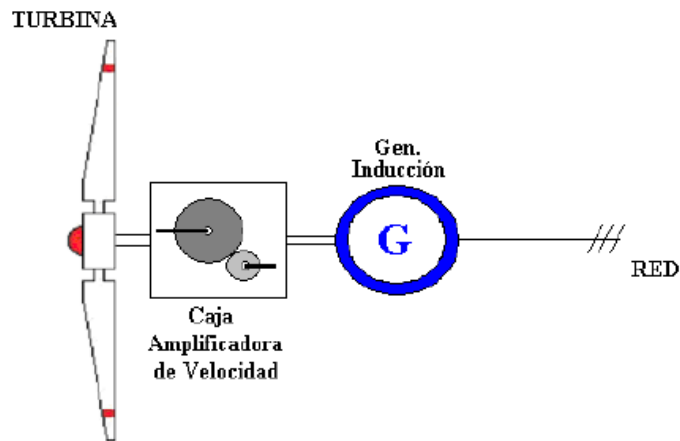


Ilustración 2-1 "Generador de velocidad fija"

- Acoplados mediante convertidores AC-DC.

En este tipo de configuración se emplean esquemas de convertidores que permiten en una primera etapa transformar el sistema de corriente alterna a uno de corriente continua, luego a través de un inversor se pasa a una segunda etapa en donde se vuelve a un sistema de corriente alterna el cual se acopla a la red, esta modalidad presenta una gran flexibilidad, ya que transfiere pocas perturbaciones al sistema y permite ajustar la velocidad de giro de las aspas al configurar los inversores, lo cual permite un mejor aprovechamiento del viento en lugares donde este es muy inestable, la principal desventaja de esta configuración es que requiere inversores de alta potencia (del orden de la capacidad de los generadores) los cuales aumentan considerablemente el costo económico de este tipo de generadores.

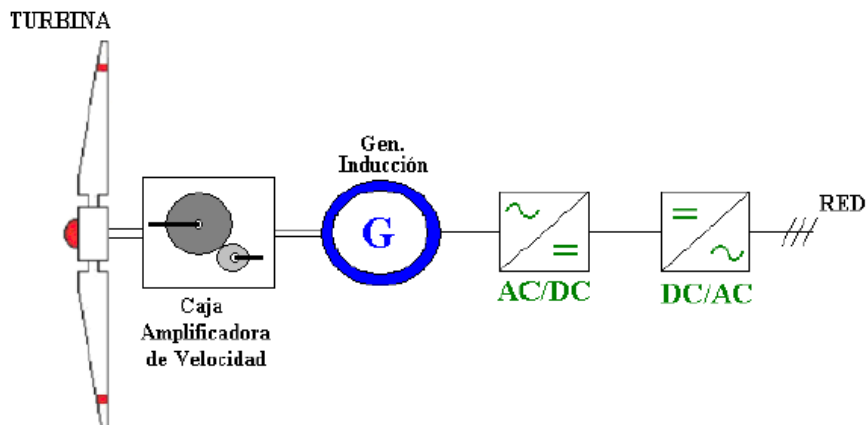


Ilustración 2-2 "Generador de velocidad variable"

### 2.1.2. Generadores Asíncronos con rotor bobinado.

- Acoplados con deslizamiento dinámico.

En esta configuración se controla mediante dispositivos de electrónica de potencia el valor de las resistencias de los enrollados de rotor lo cual permite un control sobre la velocidad del generador, ya que se aumenta o disminuye la corriente rotórica, este control sobre la velocidad permite un mejor

aprovechamiento de la energía proveniente del viento, ya que se modifica el deslizamiento de la máquina de acuerdo a las condiciones de viento existentes en el medio.

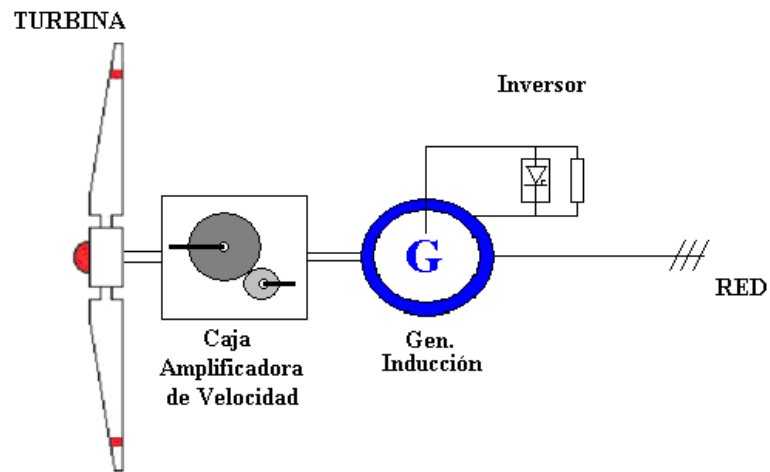


Ilustración 2-3 "Generador con deslizamiento dinámico"

- Doblemente alimentado (DFIG).

Este tipo de configuración utiliza una máquina de inducción con rotor bobinado el cual es acoplado a la red mediante bloques AC-DC, mientras que el estator es conectado directamente a la red, este esquema tiene la ventaja de que permite inyectar o extraer energía del rotor controlando así el nivel de reactivos y la velocidad de giro del generador, además los reactivos necesarios para la magnetización son aportados por el estator y por el rotor. Este sistema es el que presenta mejor control de la velocidad de la máquina frente a variaciones del viento disminuyendo así las perturbaciones que se inyectan al sistema, sin embargo la electrónica de potencia necesaria para este tipo de control incrementa considerablemente el valor del generador.

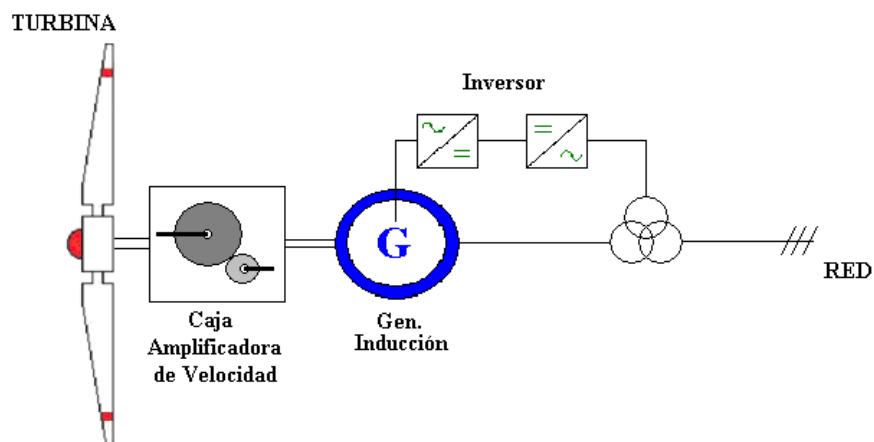


Ilustración 2-4 "Generador doblemente alimentado"

### 2.1.3. Generadores Sincrónicos.

- Generador sincrónico de velocidad variable.

Se acopla una máquina sincrónica a la red mediante convertidores AC-DC, en una primera etapa se pasa de un sistema de corriente alterna a uno de corriente continua mediante un rectificador y en una segunda etapa mediante un inversor se vuelve a un sistema de corriente alterna, esto permite que para cualquiera que sea la velocidad del viento la energía inyectada a la red cumpla con los requisitos de frecuencia disminuyendo así las perturbaciones ingresadas al sistema, sin embargo el uso de convertidores AC-DC aumenta la contaminación armónica que se inyecta a la red, lo cual en una granja compuesta de varias unidades de este tipo significaría un posible daño a la integridad del sistema.

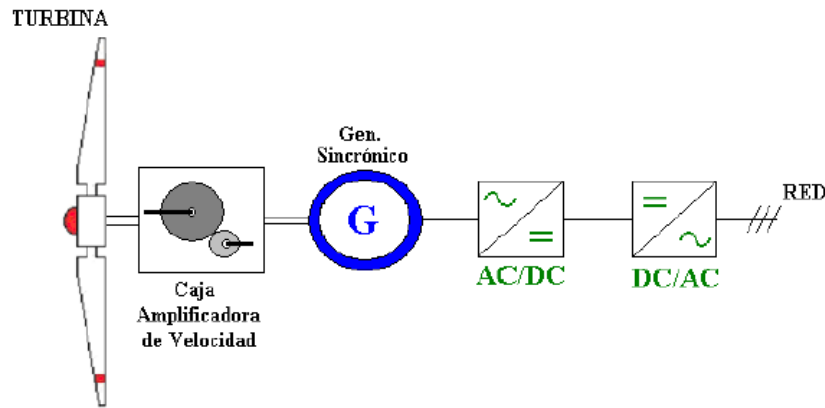


Ilustración 2-5 "Generador sincrónico de velocidad variable"

De los distintos tipos de generadores mencionados, el de más fácil implementación en un sistema eléctrico es el asincrónico de velocidad fija y acoplamiento directo a la red, ya que es el más sencillo en cuanto a sus componentes y además es el más económico. Por lo que se prevé que este tipo de máquinas sean las que tengan una mayor penetración en el mercado en un corto a mediano plazo, sin embargo estos generadores son los que inyectan mayores perturbaciones al sistema lo cual puede provocar fuertes problemas en la calidad de suministro de la energía.

En la literatura suelen describir los distintos tipos de tecnologías mediante una simbología que representa si son de velocidad fija o variable y si presentan algún tipo de control en la inyección de potencia [9][10].

Tabla 2-1 "Nomenclatura aerogeneradores"

Speed Control		Power Control		
		Stall	Pitch	Active stall
Fixed speed	Type A	A0	A1	A2
Variable speed	Type B	<del>B0</del>	B1	<del>B2</del>
	Type C	<del>C0</del>	C1	<del>C2</del>
	Type D	<del>D0</del>	D1	<del>D2</del>

Type A: “máquinas de velocidad fija”.

Se refiere a todos los aerogeneradores de inducción con rotor de jaula de ardilla que están conectados directamente a la red y que siempre absorben reactivos de la red.

Type A0 : “stall control”

Se refieren a todos los aerogeneradores de velocidad fija que tienen “stall control” (regulación de potencia por pérdida aerodinámica), estas unidades tienen las “palas” del rotor en un ángulo fijo con el fin de evitar que actúen fuerzas perjudiciales sobre el rotor cuando la velocidad del viento es demasiado alta, logrando que el exceso de energía del viento se disipe por pérdidas aerodinámicas y no sobrecargue el generador eléctrico. Estos tipos de máquinas adquirieron gran popularidad en las décadas de los 80’s y 90’s gracias al impulso de la industria Danesa, son relativamente de bajo precio y bastante robustos [23].

Type A1: “pitch control”

Este tipo de unidades están provistas de un sistema de control electrónico que regula el ángulo de paso de las aspas de manera de aprovechar de la mejor forma posible la energía proveniente del viento, con este sistema los aerogeneradores tienen una mayor controlabilidad en la potencia que inyectan a la red, sin embargo este mecanismo no es lo suficientemente rápido para evitar grandes fluctuaciones provocadas por bruscas variaciones en la velocidad del viento [23].

Type A2: “active stall control”.

Este tipo de unidades están provistas de un sistema de control electrónico que regula el ángulo de paso de las aspas, este control permite regular las pérdidas aerodinámicas de la turbina, de manera de atenuar el efecto de las fluctuaciones del viento sobre la inyección de potencia activa a la red. El sistema electromecánico que regula el ángulo de las aspas es similar al de las unidades tipo A1, sin embargo el procedimiento de control es completamente distinto, ya que las unidades A1 buscan maximizar el rendimiento, las del tipo A2 buscan disminuir el riesgo mecánico sobre el rotor aumentando las pérdidas aerodinámicas en la turbina, o sea disminuyen el rendimiento en la conversión de energía [23].

Type B: “unidades de velocidad variable limitada”

Este tipo de máquinas son aquellas que tienen rotores de inducción con acceso al bobinado, controlando el deslizamiento de la máquina mediante una resistencia variable conectada, esta configuración es conocida como WRIG (wound rotor induction generator), estos generadores son conectados directamente a la red, y tiene la particularidad de poder controlar la potencia inyectada al sistema mediante el control de la resistencia conectada al rotor.



Type C: “Unidades de velocidad variable con convertidores de frecuencia”.

Estas unidades son las conocidas como DFIG (doubly fed induction generator), gracias a su control de frecuencia cuentan con un mayor rango de control de la potencia inyectada que las unidades Tipo B y debido a los últimos adelantos en electrónica de potencia estas máquinas son cada vez más competitivas económicamente.

Type D: “Unidades de velocidad variables con rango completo de variación de frecuencia”.

Corresponden a unidades con generadores sincrónicos, que pueden ser excitados mediante imanes permanentes o eléctricamente mediante rotores bobinados y que se conectan a la red mediante convertidores AC-AC que anulan el efecto variable de la velocidad del viento, la principal desventaja de estos sistemas es el gran volumen que conlleva la construcción de máquinas sincrónicas.

## 2.2. Modelo de generador asincrónico de velocidad fija.

Como se dijo anteriormente este tipo de generador corresponde a una máquina asincrónica cuyo rotor es del tipo “jaula de ardilla”. La siguiente figura muestra el circuito equivalente de esta máquina.

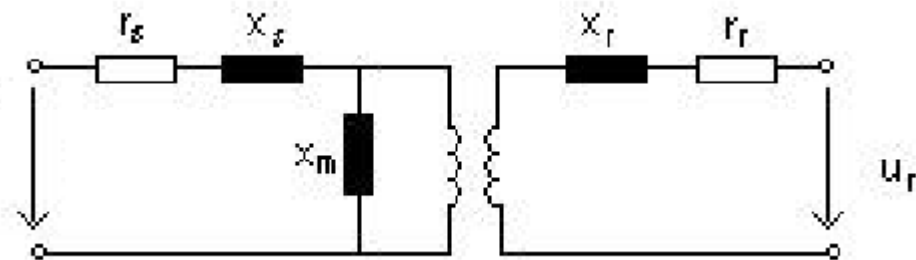


Ilustración 2-6 "modelo máquina de inducción"

El modelo que rige el comportamiento de esta máquina es de quinto orden y puede ser escrito en coordenadas “dq” usando las transformaciones adecuadas, al usar este tipo de transformación se obtiene un modelo más fácil de manejar en términos de cálculo computacional que si se utilizará el modelo clásico con un sistema de coordenadas fijo [2].

$$\begin{aligned}
 v_{ds} &= R_s \cdot i_{ds} - w \cdot \psi_{qs} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \\
 v_{qs} &= R_s \cdot i_{qs} - w \cdot \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \\
 v_{dr} &= 0 = R_r \cdot i_{dr} - (w - w_r) \cdot \psi_{qr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} \\
 v_{qr} &= 0 = R_r \cdot i_{qr} + (w - w_r) \cdot \psi_{dr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Donde:

- $v_{ds}$  y  $v_{qs}$ : Tensiones de estator referidas a los ejes “dq”
- $v_{dr}$  y  $v_{qr}$ : Tensiones de rotor referidas a los ejes “dq”
- $i_{ds}$  y  $i_{qs}$ : Corrientes de estator referidas a los ejes “dq”
- $i_{dr}$  y  $i_{qr}$ : Corrientes de rotor referidas a los ejes “dq”
- $\psi_{ds}$  y  $\psi_{qs}$ : Flujos de estator referidos a los ejes “dq”
- $\psi_{dr}$  y  $\psi_{qr}$ : Flujos de rotor referidos a los ejes “dq”
- $R_s$  y  $R_r$ : Resistencia por fase de estator y resistencia de rotor referida al estator
- $w$  y  $w_r$ : Velocidad rotacional del sistema “dq”, y velocidad angular eléctrica de rotación del rotor, ambas referidas a un sistema fijo correspondiente al estator.

Debido a que el rotor de la máquina se encuentra cortocircuitado las tensiones de rotor son cero. La velocidad eléctrica angular del rotor se puede expresar en función de la velocidad mecánica del eje de la máquina utilizando la relación.

$$w_m = \frac{2}{P} \cdot w_r$$

Donde P es el número de polos de la máquina y  $w_m$  es la velocidad mecánica.

Por otra parte las corrientes de estator y rotor se pueden expresar en función de los flujos de acuerdo a la siguiente relación matricial.

$$\begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{L_r}{L_\alpha} & 0 & \frac{L_m}{L_\alpha} & 0 \\ 0 & -\frac{L_r}{L_\alpha} & 0 & \frac{L_m}{L_\alpha} \\ \frac{L_m}{L_\alpha} & 0 & -\frac{L_s}{L_\alpha} & 0 \\ 0 & \frac{L_m}{L_\alpha} & 0 & -\frac{L_s}{L_\alpha} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{qr} \end{pmatrix} \quad (2)$$

El sistema anterior relaciona las corrientes con los flujos mediante las inductancias presentes en la máquina,  $L_r$  corresponde a la inductancia de rotor referida al estator,  $L_s$  es la inductancia por fase del estator,  $L_m$  es la inductancia mutua entre estator y rotor, y  $L_\alpha = L_m^2 - L_r L_s$ .

Al resolver el sistema de ecuaciones (1) utilizando las corrientes representadas en (2) se obtiene el modelo de quinto orden mencionado anteriormente, el torque eléctrico obtenido con la máquina expresado en coordenadas “dq” resulta:

$$T_{ele} = \frac{3P}{4} \cdot (i_{qs} \cdot \psi_{ds} - i_{ds} \cdot \psi_{qs})$$

Al realizar simulaciones computacionales con un modelo de quinto orden los tiempos empleados en las iteraciones pueden resultar excesivos, para los efectos considerados en este trabajo se simplificara este modelo a uno de tercer orden al despreciar los flujos transitorios del estator, esto no implica una disminución considerable en los resultados, ya que en estudios de estabilidad los fenómenos transitorios de la red eléctrica usualmente no se consideran por lo que despreciando los flujos transitorios se disminuye el orden del modelo [1], por lo tanto el sistema (1) se reduce a:

$$\begin{aligned}
 v_{ds} &= R_s \cdot i_{ds} - w \cdot \psi_{qs} \\
 v_{qs} &= R_s \cdot i_{qs} - w \cdot \psi_{ds} \\
 v_{dr} &= 0 = R_r \cdot i_{dr} - (w - w_r) \cdot \psi_{qr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} \\
 v_{qr} &= 0 = R_r \cdot i_{qr} + (w - w_r) \cdot \psi_{dr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} \quad (3)
 \end{aligned}$$

### 2.3. Modelo mecánico del generador.

Las posibles perturbaciones que puedan transmitirse a la red eléctrica debido a la transmisión mecánica de la energía del viento hacen necesario modelar el ensamblaje que transmite el torque mecánico al eje del generador, ya que tanto el torque mecánico " $T_{me}$ " como el eléctrico " $T_{ele}$ " están relacionados mediante la ecuación dinámica [9].

$$J \cdot \frac{dw_m}{dt} = T_{me} - T_{ele}$$

Donde " $J$ " y " $w_m$ " son el momento de inercia y la velocidad angular del generador respectivamente.

Para representar el eje de la turbina de manera analítica se considera la inercia del conjunto turbina-generador como la suma de ambas inercias.

$$I_{sistema} = I_{turbina} + I_{generador}$$

La ecuación que modela el eje considerando el conjunto turbina-generador es:

$$2 \cdot I_{sistema} \cdot \frac{dw_{sistema}}{dt} = T_{me} - T_{ele} - D_{sistema} \cdot w_{sistema}$$

Donde  $w_{sistema}$  es la velocidad angular del sistema turbina-generador y es igual al a velocidad de la turbina y a la velocidad del generador, además  $D_{sistema}$  es la amortiguación del sistema.

La transmisión mecánica del torque generado por el viento en las aspas de la turbina genera fluctuaciones que son inyectadas al sistema eléctrico, estas perturbaciones además de ser originadas por la variabilidad del viento, son producto también de la interacción mecánica de los distintos acoplamientos del generador. En la figura siguiente se muestra un modelo del sistema mecánico de la turbina eólica.

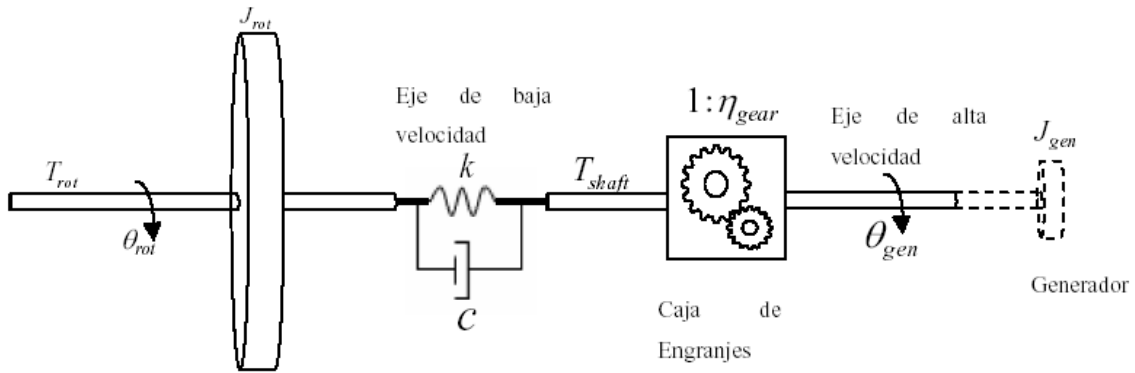


Ilustración 2-7 "Modelo dinámico del eje de la turbina"

En el modelo del generador se considera que el eje no es completamente rígido si no que posee una constante elástica de torsión "k" proporcional a la diferencia angular entre los dos extremos del eje y una constante "C" de amortiguamiento de torsión proporcional a la variación de la diferencia angular de los extremos del eje. Las ecuaciones que rigen este modelo son:

$$\begin{aligned}\dot{\theta}_{tur} &= w_{tur} \\ \dot{\theta}_k &= w_{tur} - \frac{w_{gen}}{n_{gear}} \\ \dot{w}_{tur} &= \frac{\tau_{tur} - \tau_{shaft}}{J_{tur}} \\ \tau_{shaft} &= C \cdot \dot{\theta}_k + k \cdot \theta_k \\ P_{mec\_gen} &= w_{gen} \frac{\tau_{shaft}}{n_{gear}} \\ \tau_{tur} &= \frac{P_{wind}}{w_{tur}}\end{aligned}$$

Donde

- $J_{tur}$ : Momento de inercia de la turbina.
- $J_{gen}$ : Momento de inercia del generador.
- K: Constante de rigidez.
- C: Constante de amortiguamiento.
- $n_{gear}$ : Relación caja de cambio.
- $\tau_{tur}$ : Torque de la turbina.
- $\tau_{shaft}$ : Torque en el eje de baja velocidad.
- $\dot{\theta}_{tur}=w_{tur}$ : Velocidad angular de la turbina.
- $w_{gen}$ : Velocidad angular del generador.
- $\theta_k$ : Diferencia angular entre los extremos del eje flexible.
- $P_{mec\_gen}$ : Potencia mecánica del generador.

Al acoplar el modelo mecánico del eje del sistema de transmisión de la turbina con el modelo del generador de inducción de velocidad variable se obtiene un modelo completo del sistema turbina-generador, el cual se puede utilizar para implementar granjas eólicas de generación.

## **2.4. Problemas de estabilidad del generador de velocidad fija.**

Como se ha dicho anteriormente la máquina de inducción de velocidad fija requiere permanentemente potencia reactiva para poder inducir un flujo magnético en el rotor lo cual a su vez permite generar potencia activa para ingresar al sistema. Este acoplamiento entre la energía reactiva absorbida del sistema con la potencia activa que se inyecta puede bajo ciertas condiciones presenta problemas de estabilidad de tensión [19].

Por ejemplo si se produce una cortocircuito cerca de los terminales del estator de un generador de inducción, se producirá un corriente de cortocircuito debido a la potencia inyectada al sistema por el generador, a su vez la tensión en los bornes de la máquina disminuye provocando una baja de la potencia activa y del torque eléctrico, lo cual produce un desacoplamiento entre el torque eléctrico y el torque mecánico en el eje haciendo que la turbina se acelere.

Estos problemas de aceleración pueden ser críticos si no se controlan adecuadamente, ya que pueden dañar los elementos mecánicos de la turbina. Si la falla se despeja aumentará la tensión en bornes del generador, pero el rotor se encontrará desmagnetizado lo que provocará una incapacidad en el generador para inyectar potencia activa la red, para volver a magnetizar el rotor es necesaria una corriente reactiva alta que vuelva a magnetizar el campo, esta alta corriente provoca disminuciones en la tensión en bornes mientras dura la magnetización. Una vez re-magnetizado el rotor la máquina seguirá girando a una velocidad mayor a la nominal, para disminuir esta velocidad es necesario una mayor inyección de potencia reactiva proveniente de la red lo cual también provoca una disminución de la tensión en los bornes del estator [4][9][10].

En definitiva la máquina de inducción de velocidad fija presenta considerables alteraciones en su comportamiento frente a posibles contingencias en el sistema, es por esto que se pretende en este trabajo plantear procedimientos que permitan asegurar límites de calidad de servicio de tensión en los nudos del sistema que estén más expuestos a las perturbaciones que inyectan estos grupos de generación.

## **2.5. Límites aceptados para la Regulación de Tensión.**

Para efectuar el control de tensión sobre las barras en los casos en que se incorporen parques de generación eólica es necesario saber cuáles son los márgenes aceptados de voltaje en los nodos, de manera de escoger el sistema de compensación reactiva apropiado, para esto se utilizará como referencia los niveles exigidos por la norma técnica de seguridad y calidad de servicio. [5]

La norma define distintos estados del sistema para los cuales se exigen distintos márgenes de operación, estos estados son:

- Estado Normal.
- Estado de Alerta.
- Estado de Emergencia.

En estado normal el sistema debe ser capaz de operar dentro de las bandas de variación permitidas, de manera tal que el aporte de potencia reactiva de las unidades generadoras se encuentren hasta un 90% del límite máximo del diagrama PQ.

En estado de alerta para mantener los márgenes de tensión la norma permite operar hasta el 100% de la capacidad máxima del diagrama PQ.

Por último en estado de emergencia la norma establece que el CDEC respectivo puede recomendar a los centros de control la conexión y/ desconexión de:

- Bancos de condensadores shunt.
- Condensadores síncronos
- Reactores shunt.
- Compensadores estáticos de potencia reactiva
- Bancos de transformadores y autotransformadores con cambiador de tap.
- Unidades generadoras con capacidad de inyectar o absorber potencia reactiva, estando en frío o en reserva fría.
- Líneas de transmisión.
- Consumos.

Estas acciones también son válidas para permitir el cumplimiento de los márgenes de tensión en los estados normal y de alerta.

**Tabla 2-2 "Límites exigidos por la NTSyCS"**

Tensión	Estado Normal		Estado Alerta		Estado Emergencia	
	Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	Límite superior
<b>Mayor 500 [kV]</b>	0,97	1,03	0,95	1,05	0,95	1,05
<b>200-500[kV]</b>	0,95	1,05	0,9	1,1	0,9	1,1
<b>Menor 200[kV]</b>	0,94	1,07	0,85	1,15	0,85	1,15

Con estos datos será posible determinar los esquemas de control adecuados para la regulación de tensión en los nudos que se vean perjudicados por la inyección de potencia proveniente de los parques eólicos a implementar, además la norma recomienda operaciones específicas de regulación de tensión las cuales constituirán la base de la propuesta de control a implementar.

## 2.6. Variaciones lentas tensión y pérdidas en la red (análisis estático).

Cuando la energía producida por unidades de generación eólica es absorbida localmente por cargas cercanas el impacto sobre el voltaje y las pérdidas puede ser beneficioso para la red, sin embargo si la energía debe ser transportada a nudos más lejanos entonces pueden ocurrir variaciones de tensión excesivas y además aumentan las pérdidas producto del uso de las redes eléctricas.

Al analizar un modelo de red de generación eólica como el de la figura, donde se asume absorción de reactivos por parte del aerogenerador y una impedancia en serie que conecta la máquina a un nudo infinito que simula el resto del sistema eléctrico, se pueden plantear las ecuaciones que definen la tensión  $V_1$  en función de los parámetros del sistema ( $V_0, R, X, P, Q$ ) [9].

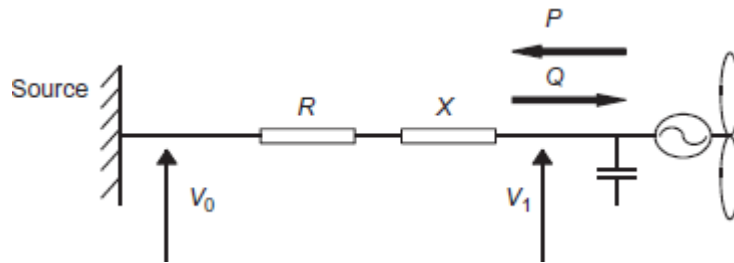


Ilustración 2-8 "Modelo de inyección de energía eólica"

$$\begin{aligned}\Delta \dot{V} &= \dot{V}_0 - \dot{V}_1 \\ \Delta \dot{V} &= -\dot{I} \cdot (R + jX) \\ \Rightarrow V_1 &= V_0 - \dot{I} \cdot (R + jX)\end{aligned}$$

Donde  $\dot{I}$  es la corriente que va desde la barra infinita hacia el aerogenerador, y por definición.

$$\begin{aligned}I &= \frac{S^*}{V_1^*} \\ S &= -P + jQ \\ \Rightarrow I &= \frac{-P - jQ}{V_1^*} \\ \Rightarrow V_1 &= V_0 + \frac{(R + jX)(P + jQ)}{V_1^*}\end{aligned}$$

Para resolver la ecuación anterior resulta conveniente plantear métodos iterativos, por ejemplo el algoritmo Gauss-Seidel con lo cual resulta:

$$V_1^{(n+1)} = V_0 + \frac{(R + jX)(P + jQ)}{V_1^{*(n)}}$$

Por otra parte las pérdidas de potencia activa en este sistema se pueden aproximar por:

$$W = \frac{(P^2 + Q^2) \cdot R}{V_0}$$

Las expresiones encontradas para las pérdidas y para la caída de tensión se pueden generalizar para un sistema que tenga acoplada una carga al generador.

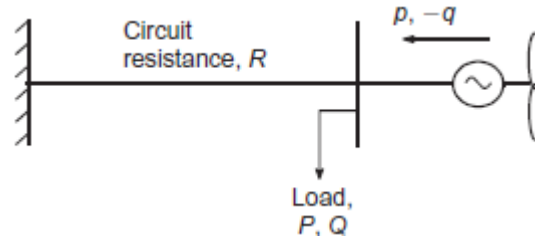


Ilustración 2-9 "Modelo de inyección de energía eólica como GD"

$$V_1^{(n+1)} = V_0 + \frac{(R + jX)((p - P) + j(q + Q))}{V_1^{*(n)}}$$

$$W = \frac{(p - P)^2 + (q + Q)^2}{V_0} \cdot R$$

A pesar que los sistemas reales son mucho más complejos y es necesario utilizar programas computacionales especializados para realizar los flujos de potencia, las expresiones anteriores permiten darse una idea de cómo varían las tensiones y pérdidas de potencia en un sistema con generación eólica, donde la principal característica es la absorción de reactivos por parte de los aerogeneradores.

## 2.7. Power Quality.

La calidad del suministro se puede describir como cuan cerca está la energía eléctrica que reciben los consumidores con respecto a los estándares de calidad que aseguran un correcto uso y funcionamiento de los equipos que finalmente utilizan dicha energía, este concepto está esencialmente centrado en los clientes que son los que en definitiva utilizan la energía eléctrica, sin embargo también adquiere un rol fundamental en los sistemas de transmisión y distribución. Existen varios aspectos importantes con respecto a la calidad del suministro eléctrico, distintos tipos de variables a medir (corriente, voltaje, frecuencia, etc.) y distintos tipos y rangos de mediciones (mediciones de régimen transiente, de corta duración, distorsión armónica, etc.).[9][10][18]

La principal importancia de los cumplimientos de calidad de suministro radica en que los consumidores han ido aumentando el uso de equipos electrónicos de mayor sensibilidad por lo que una falla en el funcionamiento de éstos por culpa de un mal suministro puede acarrear serias consecuencias económicas.



La inyección de energía eólica en una red eléctrica afecta principalmente la calidad del voltaje, y como la tensión debe cumplir con requerimientos específicos el efecto de la generación eólica debe ser calculado previo a su instalación.

La calidad de suministro es de particular importancia para los sistemas de generación eólica, especialmente los que se encuentran inmersos en sistemas de distribución con una alta impedancia de fuente y aquellos que tienen conectados consumos cercanos. Para generadores de velocidad variable que utilizan dispositivos de electrónica de potencia, la distorsión armónica del voltaje es el principal problema, mientras que para aerogeneradores de velocidad fija las variaciones en la tensión es el problema a considerar. Las variaciones de energía y potencia son causadas principalmente por la variabilidad de la velocidad del viento, sin embargo existen otros tipos de variaciones producto del efecto de las turbulencias del viento, la cizalladura del viento, el efecto sombra de torre y la operación de los sistemas de control, estos efectos dan lugar a pulsaciones periódicas en la potencia con una frecuencia igual a la del paso de las aspas de la turbina (aproximadamente de 1[HZ]), estas pulsaciones van superpuestas a la variación más lenta causada por el cambio en la velocidad del viento. Los generadores de velocidad variable tienen la ventaja de que no transmiten estas pulsaciones a la red, por otro lado los aerogeneradores de velocidad fija, al ser sometidos a pulsaciones y variaciones en la potencia mecánica dan lugar a pulsaciones y variaciones en la potencia eléctrica generada afectando así a la tensión y la frecuencia de suministro.

### **2.7.1. Características de calidad de suministro de aerogeneradores.**

De acuerdo con la IEC 61400-21 los parámetros relevantes que caracterizan la calidad de suministro de un aerogenerador son:

#### **2.7.2. Valores nominales:**

- Potencia nominal " $P_n$ ": es la máxima potencia eléctrica para la cual un generador eólico es diseñado para operar bajo condiciones normales de operación.
- Potencia reactiva nominal " $Q_n$ ": es la potencia reactiva con la cual opera el aerogenerador mientras su potencia activa, voltaje y frecuencia son las nominales.
- Potencia Aparente nominal " $S_n$ ": es la potencia aparente con la cual opera la turbina bajo condiciones nominales de potencia voltaje y frecuencia.
- Corriente nominal " $I_n$ ": es la corriente nominal con la que opera el aerogenerador bajo condiciones nominales de potencia voltaje y frecuencia.

#### **2.7.3. Potencia máxima permitida**

La potencia promedio en un rango de 10 minutos de un aerogenerador puede, dependiendo del diseño de la máquina, exceder el valor nominal, entonces la potencia máxima permitida  $P_{mc}$  sirve para definir el valor máximo de potencia que puede lograr un aerogenerador en un rango de 10 minutos, en turbinas con control activo de la potencia de salida (máquinas con control de velocidad) por lo general se obtiene  $P_{mc} = P_n$ , mientras que en máquinas con control pasivo (máquina de velocidad fija) comúnmente se tiene que  $P_{mc}$  es aproximadamente un 20% mayor que  $P_n$ .

#### **2.7.4. Potencia máxima medida.**

La potencia máxima medida  $P_{60}$ , se obtiene como el promedio de la potencia de salida en intervalos de 60 segundos y la potencia máxima medida  $P_{0,2}$ , se obtiene en intervalos de 0,2 segundos, estos valores

sirven principalmente para la implementación de los sistemas de protección y también en la operación de turbinas eólicas en redes aisladas. En turbinas de velocidad variables  $P_{60} = P_{0,2} = P_n$  mientras que para turbinas de velocidad fija  $P_{0,2}$  es comúnmente bastante mayor que  $P_n$ .

#### **2.7.5. Potencia Reactiva.**

La potencia reactiva de una turbina eólica es especificada en tablas con valores promedio de 10 minutos los cuales son en función de promedios de 10 minutos de la potencia de salida de la máquina, para 0,1%,...,90%,100% de la potencia nominal, también se deben especificar la potencia reactiva en función de las potencias  $P_{mc}$ ,  $P_{60}$  y  $P_{0,2}$ .

Turbinas eólicas con generadores de inducción conectados directamente a la red (máquina de velocidad fija) consumen potencia reactiva en función de la potencia activa que generan, este consumo es generalmente compensado por condensadores por "pasos", es decir bancos de condensadores controlados que se conectan en función de la energía reactiva absorbida por los aerogeneradores y del voltaje de la barra de conexión. Existen máquinas con la capacidad de controlar la potencia reactiva con la que operan mediante convertidores de electrónica de potencia, sin embargo su capacidad de control se ve restringida por el tamaño de estos convertidores.

#### **2.7.6. Coeficiente de "flicker" (parpadeo)**

Las fluctuaciones de potencia provenientes de los aerogeneradores durante periodos continuos de operación causan fluctuaciones en el perfil de voltaje de la red, la amplitud de estas fluctuaciones no dependen solamente de lo robusta que pueda ser la red con respecto a las amplitudes de las fluctuaciones de potencia, puesto que también dependen del ángulo de la impedancia de la red y del factor de potencia de la turbina eólica.

El "flicker" causa principalmente problemas en los sistemas de iluminación ya que la frecuencia de estas oscilaciones de voltaje son perceptibles por el ojo humano, aunque estas variaciones de tensión pueden ser pequeñas son molestosas a percepción del ojo humano para determinadas frecuencias. El coeficiente de flicker es una medida normalizada con respecto a la máxima emisión de flicker proveniente de una turbina eólica.

#### **2.7.7. Número máximo de operaciones de conmutación.**

Existen tipos de operaciones de conmutación que pueden causar efectos relevantes en las variaciones de voltaje.

- Inicio de la operación de una turbina a viento nominal.
- Conmutaciones entre los generadores de una misma turbina (solo aplicable a los casos de aerogeneradores con más de un generador o a generadores con bobinas múltiples).

#### **2.7.8. Corrientes armónicas.**

Para aerogeneradores con convertidores de electrónica de potencia la emisión de corrientes armónicas debe ser controlada estableciéndose un máximo en el coeficiente de distorsión de armónicas, sin embargo para turbinas con generadores de inducción que no poseen convertidores no es necesario tomar mayor consideración con respecto a las corrientes armónicas (de acuerdo a la IEC 61400-21).

## 2.8. Panificación eólica en Chile.

El potencial para el desarrollo en cuanto a ENRC en el país es innegable, específicamente en energía eólica, de acuerdo a estudios realizados sobre el potencial bruto de generación en base a ENRC considerando como horizonte de tiempo el año 2025 se observan potencias de generación muy superiores a la capacidad instalada del SIC (proyectada para el año 2025) [6].

Tabla 2-3 "Potenciales Brutos, estimación al 2025"

Recurso ENRC	Potencial Bruto [MW]
Hidráulica	20.392
Geotérmica	16.000
Eólica	40.000
Biomasa	13.675
Solar	40.000-100.000
Fotovoltaica	1000
<b>Total</b>	<b>191.067</b>
<b>SIC(2025)</b>	<b>22.736</b>
<b>%SIC</b>	<b>840%</b>

Sin embargo todas estas alternativas están sujetas a sus respectivas viabilidades técnico-económicas, desde el punto de vista económico la principal barrera que enfrentan estos proyectos son los costos de inversión y el periodo de recuperación de capital de acuerdo al precio de la energía, mientras que desde el punto de vista técnico se deben considerar: las características de las diversas tecnologías existentes; el marco regulatorio; los factores de planta de cada tipo de generación; etc.

Tabla 2-4 "Potencia instalable SIC [MW] 2008-2025"

Recurso ENRC	Factor Planta	Potencia Instalada 2007[MW]	Potencial Bruto [MW]	Potencial técnicamente factible 2025[MW]	Potencial económicamente factible 2025 (Escenario 1)[MW]	Potencial económicamente factible 2025 (Escenario 2)[MW]	Potencial económicamente factible 2025 (Escenario 3)[MW]
Hidráulica	0,6	117	20.392	3.003	1.421	1.653	1.850
Geotérmica	0,8	0	16.000	1.500	810	940	1.400
Eólica	0,3	18	40.000	1.500	330	998	1.200
Biomasa	0,8	191	13.675	3.249	461	501	903
Solar	0,2	0	100.000	1.051	210	210	250
Fotovoltaica	0,15	0	1000	500	100	100	150
<b>Total</b>	-	<b>326</b>	<b>191.067</b>	<b>10.803</b>	<b>3.332</b>	<b>4.402</b>	<b>5.753</b>
<b>SIC(2025)</b>	-	<b>8.608</b>	<b>22.736</b>	<b>22.736</b>	<b>22.736</b>	<b>22.736</b>	<b>22.736</b>
<b>%SIC</b>	-	<b>3,8%</b>	<b>840%</b>	<b>47,5%</b>	<b>14,7%</b>	<b>19%</b>	<b>25,3%</b>

En la tabla anterior se presentan estimaciones del potencial instalable de ENRC de acuerdo a factibilidades técnicas y económicas, los escenarios económicos están representados por distintas estimaciones del precio de la energía: el escenario 1 el más conservador tiene una estimación de US\$75/MWh con un incremento de 1% anual; el escenario 2 presenta una estimación de US\$102/MWh con un 1% de incremento anual; por último el escenario 3 también tiene una estimación de

102US\$/MWh, pero con una tasa de incremento de 3,5% anual. Por lo tanto desde el punto de vista de la energía eólica existe un potencial factible que varía entre 300-1200[MW], llegándose para el caso más optimista (el de mayor precio y tasa de crecimiento) a una penetración del 25,3%.[6]

Durante los últimos años (desde el 2007) han aumentado el número de proyectos eólicos en el SIC, solo el año pasado (2009) se inauguraron cuatro nuevas granjas: Canela 2; Monte Redondo; Totoral y Lebu, de las cuales Lebu se localiza en la región del Bio-Bio y las restantes en la región de Coquimbo convirtiéndose esta en la principal región para el desarrollo eólico en el país [12][13].

**Tabla 2-5 "Resumen generación anual SIC 2009"**

Tecnología	Potencia instalada [MW]	Generación anual [MWh] 2009
Térmica	5610,03	17172914,6
Hidráulica Embalse	3768,09	13921026,0
Hidráulica Pasada	1615,34	10573610,3
Eólica	165,5	71683,0
Canela1	18	37342,2
Canela2	60	19662,7
Monte Redondo	38	6065,0
Totoral	46	4017,5
Lebu	3,5	4595,6
<b>Total</b>	<b>11158,96</b>	<b>41739233,9</b>

La tabla anterior muestra la presencia de las distintas tecnologías en el SIC, en cuanto a potencia instalada y en cuanto a energía generada durante el año 2009, en cuanto a potencia instalada el nivel de penetración de la energía eólica es de 1,48%, y en cuanto a la generación durante el 2009 el aporte de los parques eólicos fue de 0,171% esta gran diferencia radica principalmente en que la mayoría de los parques eólicos entraron en operación a finales del 2009, por lo que es de esperar que la penetración durante el 2010 en cuanto a generación de energía eólica llegue alrededor del 1% (considerando un factor de planta de 30%).

Para el año 2010 se tiene previsto la entrada en operación en el SIC del parque Punta Colorada con una potencia de 20[MW], por otro parte la CNE planteó un programa recomendado de obras en el último informe de precio de nudo del mes de octubre del 2009, en donde aparece una importante cantidad de posibles proyectos eólicos [7].

**Tabla 2-6 "Proyectos eólicos recomendados por la CNE"**

Fecha de entrada		Proyecto	Potencia [MW]
Mes	Año		
Marzo	2011	Eólica IV Región 01	50
Marzo	2011	Eólica IV Región 02	50
Junio	201	Eólica IV Región 03	50
Julio	2011	Eólica Concepción 01	50
Diciembre	2011	Eólica Concepción 02	50
Abril	2013	Eólica IV Región 04	50
Julio	2014	Eólica IV Región 05	50
Septiembre	2014	Eólica Concepción 03	50
Abril	2016	Eólica Concepción 04	50
Abril	2017	Eólica IV Región 06	50

<b>Octubre</b>	2017	Eólica IV Región 07	50
<b>Septiembre</b>	2018	Eólica Concepción 04	50

Estos proyectos son tentativos y plantean la dirección en la que debe aumentar el nivel de generación eólica. Al revisar los proyectos en tramitación por parte de la CONAMA se observa una importante cantidad de nuevos parques en estado de “aprobados”, es decir que cumplen con la normativa ambiental, dentro de estos proyectos se encuentran granjas de gran envergadura como el parque eólico “Punta Palmera” localizado en la región de Coquimbo compuesto por 69 aerogeneradores con una capacidad instalada total de 103,5[MW], también se encuentran proyectos de co-generación cuya energía producida no se conecta al SIC, por ejemplo el parque eólico “Minera Gaby” compuesto por 20 aerogeneradores con una potencia total de 40 [MW], la energía eléctrica producida por este parque se conecta directamente a la S/E de la mina Gaby[16].

El gran aumento de los proyectos eólicos (y los de ENRC en general) se debe principalmente a la entrada en vigencia de la Ley 20.257 la cual introduce metas obligatorias a las empresas generadoras, las que a partir del año 2010 deberán asegurar que un 5% de sus retiros provendrá de ERNC aumentado dicho porcentaje en un 0,5% anual a partir del 2015 para llegar al año 2024 a un 10% en porcentaje de retiro.

Por lo tanto dentro del marco en el que se desarrolla esta memoria es esperable que se encuentren nuevas problemáticas en el SIC debido a la entrada masiva de la tecnología eólica, específicamente problemas en la variación de tensión eléctrica producto de la absorción de reactivos de los aerogeneradores.

# Capítulo 3

## Descripción del modelo.

### 3.1.Modelo Base.

El modelo base utilizado para el desarrollo del estudio consiste en una versión simplificada del SIC que consta con las principales barras y líneas de este sistema, en base a este modelo se implementarán en distintas zonas unidades de generación eólicas analizando así el comportamiento y configurando las acciones correctivas necesarias para la corrección del perfil de tensiones del sistema.

El sistema base consta de las siguientes características.

Tabla 3-1 "Características del modelo"

<b>Nº de nodos:</b>	<b>50</b>
<b>Nº de líneas:</b>	<b>70</b>
<b>Nº de transformadores:</b>	<b>16</b>
<b>Nº de generadores:</b>	<b>56</b>
<b>Nº de FACTS</b>	<b>2</b>
<b>Nº de cargas</b>	<b>48</b>
<b>Potencia Activa demandada [MW]</b>	<b>5454.0024</b>
<b>Máxima Generación Potencia Activa [MW]</b>	<b>8291.539</b>
<b>Máxima Generación Potencia Reactiva [MVar]</b>	<b>1058.3175</b>

Al comparar la demanda total implementada en este modelo con las demandas reales del sistema interconectado central se observa que el modelo se acomoda bastante bien a los escenarios reales del SIC, específicamente de acuerdo al informe de generación bruta del SIC del año 2009 el día 17 de julio la demanda máxima del sistema fue de 5453 [MW] valor prácticamente igual a la demanda del modelo base, indicando así la validez de este sistema con respecto al comportamiento real del SIC [12].

En la ilustración 3-1 se aprecia el esquemático del modelo implementado en DeepEdit donde se señalan por colores los distintos niveles de voltaje del SIC: en rojo el sistema de 500[kV]; en verde el de 220[kV]; en amarillo el de 110[kV]; en rosado el de 154[kV] y en lila el de 13.8[kV].

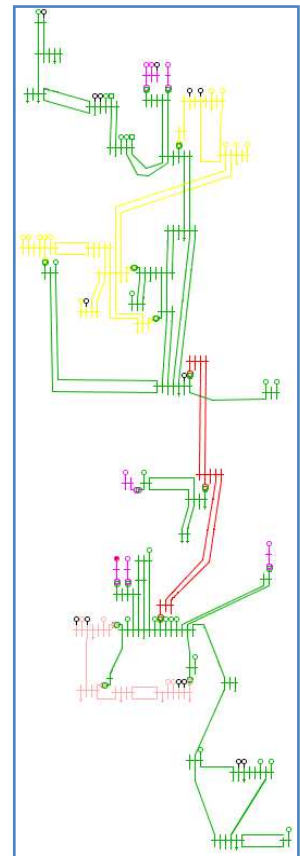


Ilustración 3-1  
"Esquemático del SIC"

### 3.2.Comportamiento del modelo base.

Al realizar un flujo de potencia al modelo base descrito anteriormente se obtiene los siguientes resultados en los distintos nudos del sistema.

Tabla 3-2 "Flujo a modelo base"

Busbar	Name	type	Volt[kV]	Deg[grad]	Pinj[p.u.]	Qinj[p.u.]
1	B_Cardones220	PQ	213,736	-41,72	-2,3611	-0,6611
2	B_Colbun220	PV	220	-26,77	4,0836	-0,1143
3	B_Toro13.8	SL	14,462	0	3,9026	0,931
4	B_Concepcion220	PQ	207,853	-18,47	0	0
5	B_Trupan220	PQ	223,472	-6,71	0	0
6	B_Chena220	PQ	217,658	-29,24	0	0
7	B_Maitencillo220	PV	224,4	-33,68	2,2425	0,0577
8	B_CerroNavia110	PQ	111,398	-54,63	-4,3647	0,9058
9	B_S/E_Ralco220	PQ	225,188	-0,46	0	0
10	B_Paposo220	PV	228,8	-38,84	1,2	0,0307
11	B_Antuco220	PQ	224,233	-5,13	0	0
12	B_Pehuenche13.8	PV	14,49	-14,73	4,14	1,1909
13	B_LosAlmendros110	PV*	106,235	-54,77	-2,2579	-0,5419
14	B_SanCristobal110	PQ	108,068	-58,44	-3,6686	0,5003
15	B_LosAlmendros220	PV	215,6	-29,14	1,15	0,0526
16	B_Charrua154	PV*	158,203	-13,12	0,713	1,6913
17	B_Charrua220	PQ	220,161	-12,58	0,6778	-0,1075
18	B_Itahue220	PQ	224,601	-22,67	-0,6	-0,37
19	B_Valdivia220	PQ	225,605	-35,85	-0,7489	-0,2647
20	B_SanIsidro13.8	PV	13,938	-44,38	1,2497	0,3032
21	B_Quillota220	PQ	222,765	-46,93	-1,3583	-0,4073
22	B_SanLuis220	PQ	223,469	-45,93	-0,0003	-0,0001
23	B_Chena110	PQ	110,036	-54,54	-3,5171	-0,0226
24	B_Hualpen154	PV	146,3	-21,59	0,5719	0,6845
25	B_DAlmagro220	PQ	222,215	-43,56	-1,3552	-0,2025
26	B_CerroNavia220	PQ	218,379	-49,5	-1,5422	-0,3126
27	B_Concepcion154	PQ	143,449	-21,92	-3,1599	-1,4835
28	B_Hualpen220	PV	213,4	-18,82	0,618	0,4806
29	B_SanPedro110	PV*	110,334	-51,77	0,1086	0,5141
30	B_Quillota110	PQ	110,172	-51,61	-1,983	-0,5949
31	B_Temuco220	PV*	223,564	-31,24	-1,0114	-0,0284
32	B_A.Jahuel500	PQ	487,218	-38,52	0	-1,5956
33	B_Charrua500	PQ	498,931	-18,57	0	-1,5767
34	B_Ancoa500	PQ	498,256	-26,21	0	-2,0463
35	B_Nehuenco13.8	PV*	13,999	-41,11	7,226	0,119
36	B_Ralco13.8	PV	14,352	4,57	5,32	0,7718
37	B_Canutillar220	PV	229,46	-33,58	1,6001	0,0283
38	B_LasVegas110	PV	109,857	-53,72	-0,6229	-0,1385
39	B_Pehuenche220	PQ	229,613	-19,4	0,39	0,1
40	B_Pangue220	PQ	229,466	-1,16	3,42	0,8
41	B_PanAzucar220	PV	224,4	-41,88	-1,296	-0,1514
42	B_SanVicente154	PQ	145,031	-22,05	-1,8126	-0,295
43	B_Ancoa220	PQ	226,547	-21,89	0	1,05
44	B_PuertoMontt220	PQ	226,913	-35,7	-1,6686	-0,3371
45	B_Antuco13.8	PV	14,421	1,52	2,7	0,1764
46	B_Esperanza220	PQ	220,055	-21,44	0	0
47	B_Rapel220	PV	229,9	-42,21	3,02	0,4304
48	B_Renca110	PV	112,2	-53,74	3,6699	1,1861
49	B_Polpaico220	PQ	219,598	-48,75	-3,3009	-0,3921
50	B_A.Jahuel220	PQ	217,526	-46,75	-9,686	1,5112

Tabla N°1.2.2 "Flujo de carga modelo base."

Los datos presentados en la tabla anterior muestran un sistema que se encuentra dentro de los rangos estables de operación.

Por otro lado las estadísticas totales de generación del modelo base son:

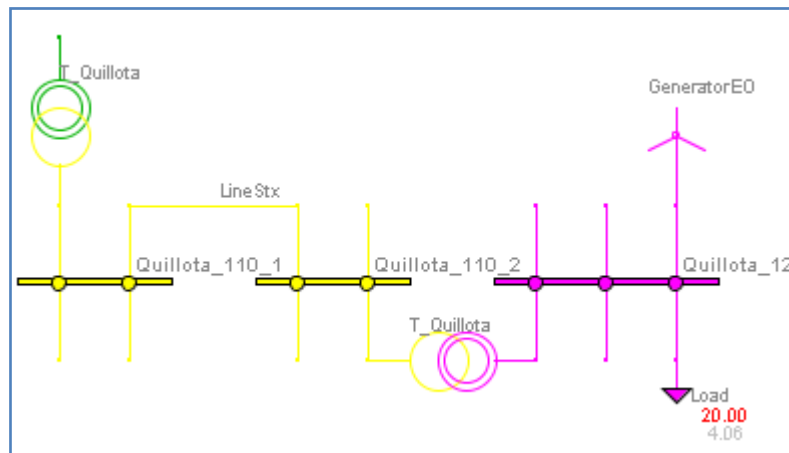
**Tabla 3-3 "Estadísticas de generación"**

Total System Power Statistics	
Ptot Gen =	5622,82 [ MW ]
Ptot Load =	5454,00 [ MW ]
P Nt.Loss =	168,81 [ MW ] 3,0 [%]
Qtot Gen =	1100,61 [MVAR]
Qtot Load =	913,44 [MVAR]
Q Nt.Loss =	187,18 [MVAR]

Al comparar los niveles de generación configurados en el flujo de potencia de las principales centrales del modelo con los datos reales de la operación diaria del SIC específicamente los correspondientes a los meses de invierno (junio, julio, agosto) del 2009 se pueden apreciar niveles de operación bastante parecidos entre sí, ratificando así la validez del modelo propuesto[13].

### 3.3.Implementación unidades eólicas.

Para la implementación de las unidades eólicas se dispuso de un sistema de sub-transmisión genérico para cada unidad, cada sub-sistema se conectará a una barra específica de los nudos troncales de 220[kV], cada uno de estos sub-sistemas están compuestos por los elementos indicados en la ilustración 3-2, estos elementos son modelados de acuerdo a equipos existentes en el SIC [14]



**Ilustración 3-2 "Sub-sistema eólico"**

Las características de los elementos del sub-sistema se describen en la siguiente tabla.



Tabla 3-4 "Características elementos del sub-sistema eólico"

	Resistencia [Ω/km]	Reactancia [Ω/km]	S.Capacitiva [μS/km]	Longitud [km]
Lineas STX	0,2979	0,395	2,8196	3

Carga	20,4 [MVA] $\cos(\varphi)=0,98$ ind.
Transformador 220/110 [kV]	Pcu=100[kW]; uk=13.95%
Transformador 110/12 [kV]	Pcu=100[kW]; uk=13.95%
Parque Eólico	12 [kV]; P=100[MW], Q=70[MW]

Como se aprecia en la tabla anterior las unidades eólicas son modeladas como fuentes de inyección de potencia activa y reactiva, específicamente estas unidades absorberán constantemente un nivel de reactivos definidos, simulando así el comportamiento de máquinas de inducción de velocidad fija, por otro lado las cargas asociadas a cada parque también son de una magnitud fija, sin embargo son descontadas de las cargas existentes en la barra troncal, es decir, la carga total del sistema no varía con respecto al sistema base.

Cada uno de estos sub-sistemas serán agregados en tres nudos específicos del modelo base del SIC, estos nudos fueron escogidos por su ubicación y por ser representativos de tres zonas con diversa topología de red. Estos son: Quillota 220; Cardones 220 y Valdivia 220. Los resultados de los flujos de carga producto de estos nuevos sub-sistemas indicaron comportamientos distintos para cada barra de generación eólica. Además debido a que los nudos estudiados se encuentran entre sí a distancias "eléctricas" relativamente grandes (separados por líneas de transmisión de más de 300 km ) los efectos producidos por cada parque no se superponen entre sí, por lo tanto es válido estudiar cada caso por separado.

### 3.4.Flujos de los nuevos sistemas y acciones de control de tensión.

Una vez implementados los tres parques eólicos con sus respectivos transformadores y líneas de transmisión se efectuó un flujo de potencia con las tres unidades desactivadas los resultados de este flujo se utilizaron como base para dimensionar el efecto de cada parque en su zona respectiva

Tabla 3-5 "Flujo de potencia con unidades eólicas desactivadas"

Busbar	Name	type	Volt[kV]	Deg[grad]	Pinj[p.u.]	Qinj[p.u.]
1	B_Cardones220	PQ	213,730	-41,7300	-2,1611	-0,6205
2	B_Colbun220	PV	220,000	-26,7800	4,0836	-0,1142
3	B_Toro13.8	SL	14,462	0,0000	3,9038	0,9314
4	B_Concepcion220	PQ	207,852	-18,4700	0,0000	0,0000
5	B_Trupan220	PQ	223,470	-6,7100	0,0000	0,0000
6	B_Chena220	PQ	217,657	-49,2400	0,0000	0,0000
7	B_Maitencillo220	PV	224,400	-33,6900	2,2425	0,0583
8	B_CerroNavia110	PQ	111,398	-24,6300	-4,3647	0,9058
9	B_S/E_Ralco220	PQ	225,187	-0,4600	0,0000	0,0000
10	B_Paposo220	PV	228,800	-38,8600	1,2000	0,0309
11	B_Antuco220	PQ	224,231	-5,1400	0,0000	0,0000
12	B_Pehuenche13.8	PV	14,490	-14,7400	4,1400	1,1912
13	B_LosAlmendros110	PV*	106,235	-34,7800	-2,2579	-0,5419
14	B_SanCristobal110	PQ	108,068	-38,4500	-3,6686	0,5003

15	B_LosAlmendros220	PV	215,600	-49,1500	1,1500	0,0531
16	B_Charrua154	PV*	158,201	-13,1200	0,7130	1,6913
17	B_Charrua220	PQ	220,158	-12,5800	0,6778	-0,1075
18	B_Itahue220	PQ	224,599	-22,6800	-0,6000	-0,3700
19	B_Valdivia220	PQ	225,601	-35,8600	-0,5489	-0,2241
20	B_SanSidro13.8	PV	13,938	-44,3900	1,2497	0,3034
21	B_SanLuis220	PQ	223,468	-45,9300	-0,0003	-0,0001
22	B_Chena110	PQ	110,036	-34,5500	-3,5171	-0,0226
23	B_Hualpen154	PV	146,300	-21,5900	0,5719	0,6847
24	B_DAlmagro220	PQ	222,213	-43,5800	-1,3552	-0,2025
25	B_CerroNavia220	PQ	218,378	-49,5000	-1,5422	-0,3126
26	B_Concepcion154	PQ	143,449	-21,9200	-3,1599	-1,4835
27	B_Hualpen220	PV	213,400	-18,8300	0,6180	0,4807
28	B_SanPedro110	PV*	110,334	-51,7700	0,1086	0,5141
29	B_Quillota110	PQ	110,171	-51,6100	-1,9830	-0,5949
30	B_Temuco220	PV*	223,560	-31,2500	-1,0114	-0,0284
31	B_AJahuel500	PQ	487,211	-38,5300	0,0000	-1,5956
32	B_Charrua500	PQ	498,923	-18,5800	0,0000	-1,5767
33	B_Ancoa500	PQ	498,248	-26,2100	0,0000	-2,0463
34	B_Nehuenco13.8	PV*	13,999	-41,1200	7,2260	0,1190
35	B_Ralco13.8	PV	14,352	4,5700	5,3200	0,7720
36	B_Canutillar220	PV	229,460	-33,5900	1,6001	0,0287
37	B_LasVegas110	PV	109,857	-53,7300	-0,6229	-0,1385
38	B_Pehuenche220	PQ	229,611	-19,4000	0,3900	0,1000
39	B_Pangue220	PQ	229,464	-1,1600	3,4200	0,8000
40	B_PanAzucar220	PV	224,400	-31,8900	-1,2960	-0,1512
41	B_SanVicente154	PQ	145,031	-22,0500	-1,8126	-0,2950
42	B_Ancoa220	PQ	226,544	-21,8900	0,0000	1,0500
43	B_PuertoMontt220	PQ	226,911	-35,7100	-1,6686	-0,3371
44	B_Antuco13.8	PV	14,421	1,5200	2,7000	0,1765
45	B_Esperanza220	PQ	220,050	-21,4400	0,0000	0,0000
46	B_Rapel220	PV	229,900	-42,2200	3,0200	0,4305
47	B_Renca110	PV	112,200	-53,7500	3,6699	1,1863
48	B_Polpaico220	PQ	219,597	-48,7600	-3,3009	-0,3922
49	B_AJahuel220	PQ	217,524	-46,7500	-9,6860	1,5111
50	Quillota_110_1	PQ	110,018	-47,3000	0,0000	0,0000
51	Quillota_110_2	PQ	109,813	-47,3900	0,0000	0,0000
52	Quillota_12	PQ	12,112	-47,4000	-0,2000	-0,0406
53	B_Quillota220	PQ	222,764	-46,9400	-1,1583	-0,3667
54	Cardones_12	PQ	11,618	-42,2300	-0,2000	-0,0406
55	Cardones_110_1	PQ	105,544	-42,1300	0,0000	0,0000
56	Cardones_110_2	PQ	105,330	-42,2300	0,0000	0,0000
57	Valdivia_110_1	PQ	111,424	-36,2200	0,0000	0,0000
58	Valdivia_110_2	PQ	111,221	-36,3100	0,0000	0,0000
59	Valdivia_12	PQ	12,268	-36,3100	-0,2000	-0,0406

En la tabla anterior se indican en color rojo los nueve nudos correspondientes a los sub-sistemas de transmisión y las barras de inyección eólica, la nomenclatura definida para nombrar las barras es la siguiente.

Por ejemplo para el sub-sistema conectado a la barra Quillota200 se tiene que

- Quillota\_110\_1: corresponde a la barra donde va instalado el transformador de bajada 220/110 [kV] y donde comienza la línea de Sub-transmisión.
- Quillota\_110\_2: corresponde a la barra donde termina la línea de Sub-transmisión y donde se conecta el transformador de bajada 110/12 [kV]
- Quillota\_12: es la barra donde va conectado el parque eólico y la carga asociada.

Este mismo criterio se aplica para el caso de Cardones220 y Valdivia220.

Por lo tanto se observa que tanto para Quillota\_12 y Valdivia\_12 se tienen tensiones sobre la nominal, mientras que para Cardones\_12 la tensión es inferior por lo cual se espera que el caso de inyección eólica en Cardones sea el más crítico en cuanto al perfil de tensiones obtenidos.

Tabla 3-6 "Estadísticas de generación del SIC con unidades eólicas desactivadas"

Total System Power Statistics	
<b>Ptot Gen =</b>	5622.94 [ MW ]
<b>Ptot Load =</b>	5454.00 [ MW ]
<b>P Nt.Loss =</b>	168.94 [ MW ], 3.0 [%]
<b>Qtot Gen =</b>	1100.98 [MVAR]
<b>Qtot Load =</b>	913.44 [MVAR]
<b>Q Nt.Loss =</b>	187.55 [MVAR]

Por último se tiene la tabla resumen del flujo anterior la cual indica que prácticamente no hay diferencias con respecto al modelo base por lo tanto el haber instalado estos tres sub-sistemas de transmisión no altero el comportamiento del sistema. De ahora en adelante los resultados que se obtengan se compararán con respecto a los datos descritos en las tablas anteriores.

### 3.4.1. Quillota 220.

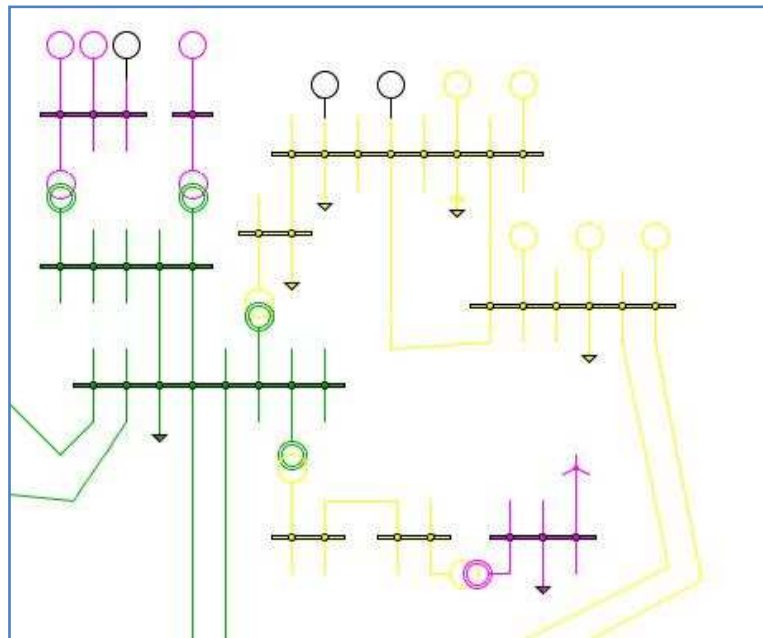


Ilustración 3-3 "Subsistema eólico Quillota220"

En este caso de estudio se tiene cercanos a la barra de inyección eólica cuatro nudos de generación convencional: Nehuenco\_13,8; SanIsidro\_13,8; SanPedro\_110 y LasVegas\_110. Por lo tanto a diferencias de los otros casos aquí hay más grados de libertad para poder regular la tensión en la barra de estudio. Al evaluar el flujo de carga en este sub-sistema se obtienen los siguientes resultados donde se agregó una columna que indica la diferencia de tensión de este caso con respecto al caso base modificado.

Tabla 3-7 "Flujo de potencia caso base modificado Quillota 220"

Busbar	Name	type	Volt[kV]	Deg[grad]	Pinj[p.u.]	Qinj[p.u.]	Dif c/r a Sin Eólica [%].
1	B_Cardones220	PQ	213,730	-34,530	-2,1611	-0,6205	0,000
2	B_Colbun220	PV	220,000	-20,810	4,0836	-0,1633	0,000
3	B_Toro13.8	SL	14,462	0,000	2,8093	0,6742	0,000
4	B_Concepcion220	PQ	208,579	-15,800	0,0000	0,0000	-0,350
5	B_Trupan220	PQ	224,754	-4,850	0,0000	0,0000	-0,575
6	B_Chena220	PQ	218,115	-42,950	0,0000	0,0000	-0,210
7	B_Maitencillo220	PV	224,400	-56,490	2,2425	0,0583	0,000
8	B_CerroNavia110	PQ	111,428	-48,230	-4,3647	0,9070	-0,027
9	B_S/E_Ralco220	PQ	225,664	2,020	0,0000	0,0000	-0,212
10	B_Paposo220	PV	228,800	-41,650	1,2000	0,0309	0,000
11	B_Antuco220	PQ	225,161	-3,680	0,0000	0,0000	-0,415
12	B_Pehuenche13.8	PV	14,490	-10,690	4,1400	0,9439	0,000
13	B_LosAlmendros110	PV*	106,233	-48,580	-2,2578	-0,5419	0,002
14	B_SanCristobal110	PQ	108,083	-52,130	-3,6686	0,5007	-0,014
15	B_LosAlmendros220	PV	215,600	-43,030	1,1500	-0,1894	0,000
16	B_Charrua154	PV	158,620	-10,540	0,7130	1,4185	-0,265
17	B_Charrua220	PQ	221,716	-10,020	0,6778	-0,1075	-0,708
18	B_Itahue220	PQ	226,273	-18,580	-0,6000	-0,3700	-0,745
19	B_Valdivia220	PQ	225,922	-32,970	-0,5489	-0,2241	-0,142
20	B_Sansidro13.8	PV	13,938	-36,990	1,2499	0,5375	0,000
21	B_SanLuis220	PQ	222,335	-38,540	-0,0002	-0,0001	0,507
22	B_Chena110	PQ	110,148	-48,190	-3,5171	-0,0205	-0,102
23	B_Hualpen154	PV	146,300	-18,890	0,5719	0,6022	0,000
24	B_DAlmagro220	PQ	222,213	-46,370	-1,3552	-0,2025	0,000
25	B_CerroNavia220	PQ	218,622	-43,100	-1,5422	-0,3126	-0,112
26	B_Concepcion154	PQ	143,641	-19,240	-3,1599	-1,4835	-0,134
27	B_Hualpen220	PV	213,400	-16,130	0,6180	0,4287	0,000
28	B_SanPedro110	PV*	109,981	-44,590	0,1086	0,5135	0,320
29	B_Quillota110	PQ	109,793	-44,410	-1,9830	-0,5949	0,343
30	B_Temuco220	PV*	224,424	-28,420	-1,0113	-0,0284	-0,386
31	B_A.Jahuel500	PQ	492,307	-33,200	0,0000	-1,6290	-1,046
32	B_Charrua500	PQ	503,945	-15,320	0,0000	-1,6084	-1,007
33	B_Ancoa500	PQ	504,095	-22,050	0,0000	-2,0944	-1,174
34	B_Nehuenco13.8	PV*	13,927	-33,680	7,2255	0,1198	0,514
35	B_Ralco13.8	PV	14,352	7,040	5,3200	0,6432	0,000
36	B_Canutiliar220	PV	229,460	-30,680	1,6000	-0,0054	0,000
37	B_LasVegas110	PV	109,857	-46,790	-0,6228	-0,0733	0,000
38	B_Pehuenche220	PQ	230,722	-15,330	0,3900	0,1000	-0,484
39	B_Pangue220	PQ	230,964	0,870	3,4200	0,8000	-0,654
40	B_PanAzucar220	PV	224,400	-54,680	-1,2959	-0,1066	0,000
41	B_SanVicente154	PQ	145,090	-19,350	-1,8126	-0,2950	-0,041
42	B_Ancoa220	PQ	228,195	-17,810	0,0000	1,0652	-0,729
43	B_PuertoMontt220	PQ	227,094	-32,810	-1,6686	-0,3368	-0,081
44	B_Antuco13.8	PV	14,421	2,950	2,7000	0,0794	0,000
45	B_Esperanza220	PQ	221,357	-18,740	0,0000	0,0000	-0,594
46	B_Rapel220	PV	229,900	-35,810	3,0200	0,4058	0,000
47	B_Renca110	PV	112,200	-47,350	3,6700	1,1234	0,000
48	B_Polpaico220	PQ	219,446	-42,060	-3,3009	-0,3930	0,069
49	B_A.Jahuel220	PQ	218,409	-40,730	-9,6860	1,5458	-0,407
50	Quillota_110_1	PQ	106,823	-38,070	0,0000	0,0000	2,904
51	Quillota_110_2	PQ	106,661	-37,260	0,0000	0,0000	2,870
52	Quillota_12	PQ	11,764	-37,260	0,8000	-0,7406	2,873
53	B_Quillota220	PQ	221,529	-39,550	-1,1583	-0,3667	0,554
54	Cardones_12	PQ	11,618	-45,030	-0,2000	-0,0406	0,000
55	Cardones_110_1	PQ	105,544	-44,920	0,0000	0,0000	0,000
56	Cardones_110_2	PQ	105,330	-45,030	0,0000	0,0000	0,000
57	Valdivia_110_1	PQ	111,583	-33,320	0,0000	0,0000	-0,143
58	Valdivia_110_2	PQ	111,380	-33,420	0,0000	0,0000	-0,143
59	Valdivia_12	PQ	12,285	-33,420	-0,2000	-0,0406	-0,139

Al comparar los resultados de las barras relevantes de este caso con respecto al caso base modificado se observan que las principales diferencias están en las barras del sub-sistema de transmisión y en la barra de inyección eólica (marcados en rojo en la tabla anterior) las cuales bajan alrededor de un 3%, sin comprometer mucho su tensión (están sobre un 95% de su voltaje nominal), es interesante mencionar que hay barras en el sistema que aumentan su tensión debido a la instalación del parque eólico, por ejemplo la barras del sistema troncal de 500[kV] las cuales suben su tensión del orden de 1%.

Por otro lado las estadísticas totales de generación de este caso son.

**Tabla 3-8 "Estadísticas generación caso modificado Quillota 220"**

<b>Total System Power Statistics</b>	
<b>Ptot Gen =</b>	5613.50 [ MW ]
<b>Ptot Load =</b>	5454.00 [ MW ]
<b>P Nt.Loss =</b>	159.50 [ MW ], 2.8 [%]
<b>Qtot Gen =</b>	904.29 [MVAR]
<b>Qtot Load =</b>	913.44 [MVAR]
<b>Q Nt.Loss =</b>	-9.15 [MVAR]

De estas estadísticas es destacable el hecho de que disminuyen las pérdidas de potencia activa en el sistema con respecto al caso base, esto es debido a que la unidad de generación eólica esta cercana a una barra de carga (Quillota 220) disminuyendo así el trayecto de flujo necesario para satisfacer la demanda de esa carga, es decir, se evitan pérdidas por transporte.

Para la compensación de voltaje de los nudos estudiados se adoptaron diversas configuraciones en la consignas de los generadores cercanos.

Se detallarán dos configuraciones probadas que corrigen la tensión en la barra Quillota\_12.

- Configuración 1.

En este caso se establecen las siguientes consignas para los generadores presentes en la zona

**Tabla 3-9 "Consigna de tensiones Configuración 1 Quillota220"**

<b>Barra</b>	<b>Central</b>	<b>Consigna [pu]</b>
<b>B_Nehuenco13.8</b>	Nehuenco 1	1,04
<b>B_Nehuenco13.8</b>	Nehuenco 2	1,04
<b>B_SanIsidro13.8</b>	San Isidro	1,04
<b>B_SanPedro110</b>	Ventanas 1	1,03
<b>B_SanPedro110</b>	Ventanas 2	1,03
<b>B_LasVegas110</b>	Aconcagua	1,03
<b>B_LasVegas110</b>	Los Quilos	1,03
<b>B_LasVegas110</b>	Chacabuquito	1,03

Los resultados producto de estos cambios en las referencias de voltaje son:

Tabla 3-10 "Flujo de potencia Configuración 1 Quillota220"

Busbar	Name	type	Volt[kV]	Deg[grad]	Pinj[p.u.]	Qinj[p.u.]	Dif c/r SIC sineolica [%]	Dif c/r solo Quillota[%]
1	B_Cardones220	PQ	213,73	-43,71	-2,1611	-0,6205	0,0000	0,00000
2	B_Colbun220	PV	220	-20,6	4,0836	-0,2374	0,0000	0,00000
3	B_Toro13.8	SL	14,462	0	2,7939	0,6544	0,0000	0,00000
4	B_Concepcion220	PQ	208,666	-15,75	0	0	-0,3916	-0,04171
5	B_Trupan220	PQ	224,893	-4,82	0	0	-0,6368	-0,06185
6	B_Chena220	PQ	219,609	-42,62	0	0	-0,8968	-0,68496
7	B_Maitencillo220	PV	224,4	-55,67	2,2425	0,0583	0,0000	0,00000
8	B_CerroNavia110	PQ	111,685	-47,81	-4,3647	0,9181	-0,2576	-0,23064
9	B_S/E_Ralco220	PQ	225,724	2,05	0	0	-0,2385	-0,02659
10	B_Paposo220	PV	228,8	-60,83	1,2	0,0309	0,0000	0,00000
11	B_Antuco220	PQ	225,259	-3,66	0	0	-0,4585	-0,04352
12	B_Pehuenche13.8	PV	14,49	-10,62	4,14	0,8756	0,0000	0,00000
13	B_LosAlmendros110	PV*	106,311	-48,19	-2,2577	-0,5412	-0,0715	-0,07342
14	B_SanCristobal110	PQ	108,29	-51,7	-3,6686	0,5108	-0,2054	-0,19152
15	B_LosAlmendros220	PV	215,6	-42,66	1,15	-0,5668	0,0000	0,00000
16	B_Charrua154	PV	158,62	-10,5	0,713	1,3583	-0,2649	0,00000
17	B_Charrua220	PQ	221,913	-9,98	0,6778	-0,1075	-0,7972	-0,08885
18	B_Itahue220	PQ	226,735	-18,5	-0,6	-0,37	-0,9510	-0,20418
19	B_Valdivia220	PQ	225,975	-32,88	-0,5487	-0,2241	-0,1658	-0,02346
20	B_Sansidro13.8	PV	14,352	-37,05	1,25	0,7887	-2,9703	-2,97030
21	B_SanLuis220	PQ	227,905	-38,52	0	0	-1,9855	-2,50523
22	B_Chena110	PQ	110,623	-47,8	-3,5171	-0,0111	-0,5335	-0,43124
23	B_Hualpen154	PV	146,3	-18,83	0,5719	0,5938	0,0000	0,00000
24	B_DAlmagro220	PQ	222,213	-45,56	-1,3552	-0,2024	0,0000	0,00000
25	B_CerroNavia220	PQ	220,28	-42,76	-1,5422	-0,3126	-0,8710	-0,75839
26	B_Concepcion154	PQ	143,66	-19,19	-3,1599	-1,4835	-0,1471	-0,01323
27	B_Hualpen220	PV	213,4	-16,07	0,618	0,4222	0,0000	0,00000
28	B_SanPedro110	PV	113,3	-44,34	0,1087	0,6712	-2,6882	-3,01779
29	B_Quillota110	PQ	113,045	-44,15	-1,983	-0,5948	-2,6087	-2,96194
30	B_Temuco220	PV*	224,558	-28,34	-1,0112	-0,0273	-0,4464	-0,05971
31	B_A.Jahuel500	PQ	494,898	-33	0	-1,6469	-1,5778	-0,52630
32	B_Charrua500	PQ	504,918	-15,25	0	-1,6158	-1,2016	-0,19308
33	B_Ancoa500	PQ	505,706	-21,94	0	-2,109	-1,4968	-0,31958
34	B_Nehuenco13.8	PV	14,352	-33,92	7,225	0,5712	-2,5216	-3,05163
35	B_Ralco13.8	PV	14,352	7,07	5,32	0,6269	0,0000	0,00000
36	B_Canutillar220	PV	229,46	-30,59	1,6	-0,0113	0,0000	0,00000
37	B_LasVegas110	PV	113,3	-46,51	-0,6228	0,1828	-3,1341	-3,13407
38	B_Pehuenche220	PQ	231,029	-15,25	0,39	0,1	-0,6176	-0,13306
39	B_Pangue220	PQ	231,127	0,89	3,42	0,8	-0,7247	-0,07057
40	B_PanAzucar220	PV	224,4	-53,87	-1,2959	-0,2952	0,0000	0,00000
41	B_SanVicente154	PQ	145,096	-19,3	-1,8126	-0,295	-0,0448	-0,00414
42	B_Ancoa220	PQ	228,651	-17,72	0	1,0699	-0,9301	-0,19983
43	B_PuertoMontt220	PQ	227,126	-32,71	-1,6685	-0,3362	-0,0948	-0,01409
44	B_Antuco13.8	PV	14,421	2,97	2,7	0,0693	0,0000	0,00000
45	B_Esperanza220	PQ	221,536	-18,68	-0,0002	0	-0,6753	-0,08086
46	B_Rapel220	PV	229,9	-35,42	3,02	0,2383	0,0000	0,00000
47	B_Renca110	PV	112,2	-46,91	3,67	0,5987	0,0000	0,00000
48	B_Polpaico220	PQ	222,448	-41,82	-3,3008	-0,3766	-1,2983	-1,36799
49	B_A.Jahuel220	PQ	219,745	-40,44	-9,686	1,6004	-1,0210	-0,61170
50	Quillota_110_1	PQ	109,479	-38,06	0	0	0,4899	-2,48636
51	Quillota_110_2	PQ	109,321	-37,29	0	0	0,4480	-2,49388
52	Quillota_12	PQ	12,057	-37,29	0,8	-0,7406	0,4541	-2,49065
53	B_Quillota220	PQ	226,758	-39,48	-1,1582	-0,3667	-1,7929	-2,36041
54	Cardones_12	PQ	11,618	-44,21	-0,2	-0,0406	0,0000	0,00000
55	Cardones_110_1	PQ	105,545	-44,1	0	0	-0,0009	-0,00095
56	Cardones_110_2	PQ	105,33	-44,21	0	0	0,0000	0,00000
57	Valdivia_110_1	PQ	111,609	-33,23	0	0	-0,1660	-0,02330
58	Valdivia_110_2	PQ	111,406	-33,32	0	0	-0,1663	-0,02334
59	Valdivia_12	PQ	12,288	-33,33	-0,2	-0,0406	-0,1630	-0,02442

En la tabla anterior se añadió una columna donde se comparan las diferencias porcentuales.

Al analizar los resultados de la tabla anterior se aprecia que al realizar las acciones de corrección el estado del sistema en cuanto a tensiones volvió a ser similar al caso base modificado (tensiones en las barras PQ), además se logro que la barra de generación eólica tenga una tensión muy cercana a su valor nominal.

- Configuración 2.

Tabla 3-11 "Consignas de tensión Configuración 2 Quillota 220"

Barra	Central	Consigna [pu]
B_Nehuenco13.8	Nehuenco 1	1,029
B_Nehuenco13.8	Nehuenco 2	1,029
B_SanIsidro13.8	San Isidro	1,03
B_SanPedro110	Ventanas 1	1,05
B_SanPedro110	Ventanas 2	1,05
B_LasVegas110	Aconcagua	0,9987
B_LasVegas110	Los Quilos	0,9987
B_LasVegas110	Chacabuquito	0,9987

Tabla 3-12 "Flujo de potencia Configuración 2 Quillota 220"

Busbar	Name	type	Volt[kV]	Deg[grad]	Pinj[p.u.]	Qinj[p.u.]	Dif c/r SIC sineolica[%]	Dif c/r solo Quillota [%]
1	B_Cardones220	PQ	215,542	-43,83	-2,1611	-0,6197	0,000	0,000
2	B_Colbun220	PV	220	-20,66	4,0836	-0,2203	0,000	0,000
3	B_Toro13.8	SL	14,462	0	2,7994	0,6594	0,000	0,000
4	B_Concepcion220	PQ	208,644	-15,77	0	0	-0,792	-0,065
5	B_Trupan220	PQ	224,858	-4,83	0	0	-1,388	-0,104
6	B_Chena220	PQ	219,242	-42,7	0	0	-1,585	-1,127
7	B_Maitencillo220	PV	226,3	-55,94	2,2425	0,1746	-1,900	-1,900
8	B_CerroNavia110	PQ	111,55	-47,91	-4,3647	0,9132	-0,152	-0,122
9	B_S/E_Ralco220	PQ	225,71	2,04	0	0	-0,523	-0,046
10	B_Paposo220	PV	229,351	-50,9	1,2	-0,0041	-0,551	-0,551
11	B_Antuco220	PQ	225,234	-3,66	0	0	-1,003	-0,073
12	B_Pehuenche13.8	PV	14,49	-10,64	4,14	0,8918	0,000	0,000
13	B_LosAlmendros110	PV*	106,273	-48,29	-2,2577	-0,5411	-0,038	-0,040
14	B_SanCristobal110	PQ	108,188	-51,81	-3,6685	0,5086	-0,120	-0,105
15	B_LosAlmendros220	PV	215,6	-42,75	1,15	-0,4726	0,000	0,000
16	B_Charrua154	PV	158,62	-10,51	0,713	1,3732	-0,419	0,000
17	B_Charrua220	PQ	221,865	-9,99	0,6778	-0,1075	-1,707	-0,149
18	B_Itahue220	PQ	226,625	-18,52	-0,6	-0,37	-2,026	-0,352
19	B_Valdivia220	PQ	225,957	-32,91	-0,5489	-0,2241	-0,356	-0,035
20	B_SanIsidro13.8	PV	14,214	-37,05	1,25	0,6003	-0,276	-0,276
21	B_SanLuis220	PQ	226,538	-38,54	0	0	-3,070	-4,203
22	B_Chena110	PQ	110,464	-47,9	-3,5171	-0,0135	-0,428	-0,316
23	B_Hualpen154	PV	146,3	-18,85	0,5719	0,5959	0,000	0,000
24	B_DAlmagro220	PQ	223,309	-55,6	-1,3552	-0,2004	-1,096	-1,096
25	B_CerroNavia220	PQ	219,878	-42,85	-1,5422	-0,3126	-1,500	-1,256
26	B_Concepcion154	PQ	143,655	-19,2	-3,1599	-1,4835	-0,206	-0,014
27	B_Hualpen220	PV	213,4	-16,09	0,618	0,4238	0,000	0,000
28	B_SanPedro110	PV*	114,343	-44,38	0,1083	1,9914	-4,009	-4,362
29	B_Quillota110	PQ	113,919	-44,17	-1,9823	-0,5949	-3,748	-4,126
30	B_Temuco220	PV*	224,513	-28,36	-1,0113	-0,0281	-0,953	-0,089
31	B_A.Jahuel500	PQ	494,289	-33,06	0	-1,6438	-7,078	-1,982
32	B_Charrua500	PQ	504,682	-15,27	0	-1,6141	-5,759	-0,737
33	B_Ancoa500	PQ	505,32	-21,98	0	-2,1061	-7,072	-1,225
34	B_Nehuenco13.8	PV	14,2	-33,86	7,225	0,1622	-0,201	-0,273
35	B_Ralco13.8	PV	14,352	7,06	5,32	0,6309	0,000	0,000
36	B_Canutillar220	PV	229,46	-30,62	1,6	-0,0093	0,000	0,000

37	B_LasVegas110	PV	109,857	-46,22	-0,6225	-0,9284	0,000	0,000
38	B_Pehuenche220	PQ	230,956	-15,28	0,39	0,1	-1,345	-0,234
39	B_Pangue220	PQ	231,086	0,88	3,42	0,8	-1,622	-0,122
40	B_PanAzucar220	PV	224,4	-54,04	-1,2959	-0,3669	0,000	0,000
41	B_SanVicente154	PQ	145,095	-19,31	-1,8126	-0,295	-0,064	-0,005
42	B_Ancoa220	PQ	228,543	-17,75	0	1,069	-1,999	-0,348
43	B_PuertoMontt220	PQ	227,114	-32,74	-1,6686	-0,3365	-0,203	-0,020
44	B_Antuco13.8	PV	14,421	2,96	2,7	0,0718	0,000	0,000
45	B_Esperanza220	PQ	221,485	-18,7	0	0	-1,435	-0,128
46	B_Rapel220	PV	229,9	-35,52	3,02	0,2789	0,000	0,000
47	B_Renca110	PV	112,2	-47,02	3,67	0,874	0,000	0,000
48	B_Polpaico220	PQ	221,794	-41,89	-3,3008	-0,379	-2,197	-2,348
49	B_A.Jahuel220	PQ	219,436	-40,52	-9,686	1,5914	-1,912	-1,027
50	Quillota_110_1	PQ	108,925	-38,09	0	0	1,093	-2,102
51	Quillota_110_2	PQ	108,766	-37,31	0	0	1,047	-2,105
52	Quillota_12	PQ	12,000	-37,3	0,8	-0,7406	0,116	-0,232
53	B_Quillota220	PQ	225,666	-39,52	-1,1583	-0,3667	-2,902	-4,137
54	Cardones_12	PQ	11,717	-44,32	-0,2	-0,0406	-0,099	-0,099
55	Cardones_110_1	PQ	106,442	-44,22	0	0	-0,898	-0,898
56	Cardones_110_2	PQ	106,229	-44,32	0	0	-0,899	-0,899
57	Valdivia_110_1	PQ	111,6	-33,26	0	0	-0,176	-0,017
58	Valdivia_110_2	PQ	111,397	-33,36	0	0	-0,176	-0,017
59	Valdivia_12	PQ	12,287	-33,36	-0,2	-0,0406	-0,019	-0,002

Por lo tanto para la zona de estudio Quillota se logró establecer la tensión de la barra Quillota12 en su valor nominal mediante dos configuraciones distintas en consignas de tensión de los generadores cercanos, por lo tanto se puede corroborar que existen un conjunto de configuraciones de tensiones de los generadores que permiten efectuar la regulación de tensión requerida.

### 3.4.2. Cardones 220.

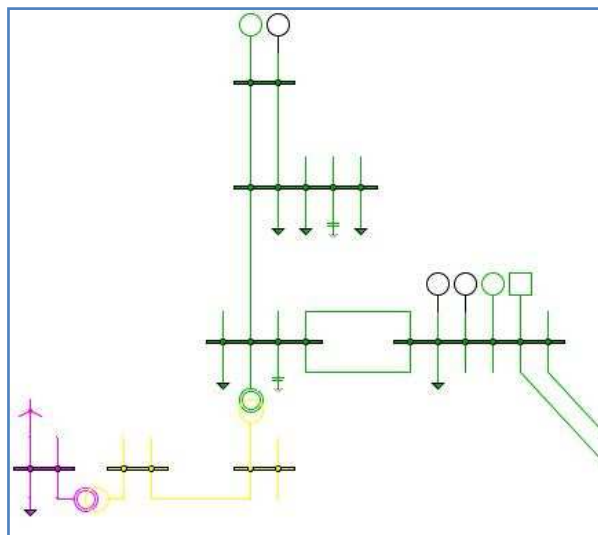


Ilustración 3-4 "Sub-sistema eólico Cardones220"

En este caso de estudio se tienen barras convencionales de generación lejanas a la barra de inyección eólica, con separaciones del orden de los 200 km (largos de las líneas entre las barras), la únicas barras que pueden aportar en la regulación de tensión son: Guacolda220; TalTal220, a "priori" se puede vislumbrar un déficit de capacidad de regulación debido a las grandes distancias existentes entre las posibles barras controladoras y la barra de inyección eólica siendo así necesario las instalación de un



nuevo dispositivo que pueda aportar en la regulación de tensión. Los resultados del flujo de potencia aplicado a este sistema son.

Tabla 3-13 "Flujo de potencia caso base modificado Cardones 220"

Busbar	Name	type	Volt[kV]	Deg[grad]	Pinj[p.u.]	Qinj[p.u.]	Dif c/r SIC sin eolica
1	B_Cardones220	PQ	209,53	-45,61	-2	-0,6224	-4,20
2	B_Colbun220	PV	220,00	-19,94	4	-0,1945	0,00
3	B_Toro13.8	SL	14,46	0	3	0,6406	0,00
4	B_Concepcion220	PQ	208,68	-15,43	0	0	0,83
5	B_Trupan220	PQ	224,94	-4,59	0	0	1,47
6	B_Chena220	PQ	218,67	-41,99	0	0	1,01
7	B_Maitencillo220	PV	224,40	-41,18	2	0,2934	0,00
8	B_CerroNavia110	PQ	111,49	-47,24	-4	0,9093	0,09
9	B_S/E_Ralco220	PQ	225,73	2,37	0	0	0,55
10	B_Paposo220	PV	228,80	-42,98	1	0,1383	0,00
11	B_Antuco220	PQ	225,29	-3,47	0	0	1,06
12	B_Pehuenche13.8	PV	14,49	-10,12	4	0,8911	0,00
13	B_LosAlmendros110	PV*	106,25	-47,62	-2	-0,5419	0,01
14	B_SanCristobal110	PQ	108,13	-51,14	-4	0,5018	0,06
15	B_LosAlmendros220	PV	215,60	-42,08	1	-0,3429	0,00
16	B_Charrua154	PV	158,62	-10,18	0,713	1	0,42
17	B_Charrua220	PQ	221,95	-9,66	0,6778	-0,1075	1,79
18	B_Itahue220	PQ	226,63	-18	-0,6	-0,37	2,03
19	B_Valdivia220	PQ	225,97	-32,56	-0,5489	-0,2241	0,37
20	B_Sansidro13.8	PV	13,94	-35,98	1	0,2155	0,00
21	B_SanLuis220	PQ	223,89	-37,53	-0,0004	-0,0001	0,43
22	B_Chena110	PQ	110,30	-47,21	-4	-0,0176	0,27
23	B_Hualpen154	PV	146,30	-18,51	0,5719	0,5925	0,00
24	B_DAlmagro220	PQ	220,51	-47,68	-1	-0,2056	-1,71
25	B_CerroNavia220	PQ	219,21	-42,12	-2	-0,3126	0,83
26	B_Concepcion154	PQ	143,66	-18,86	-3	-1	0,21
27	B_Hualpen220	PV	213,40	-15,74	0,618	0,4212	0,00
28	B_SanPedro110	PV*	110,47	-43,52	0,1086	0,5143	0,14
29	B_Quillota110	PQ	110,32	-43,34	-2	-0,5949	0,15
30	B_Temuco220	PV*	224,55	-28,01	-1	-0,0284	0,99
31	B_A.Jahuel500	PQ	493,81	-32,42	0	-2	6,60
32	B_Charrua500	PQ	504,85	-14,85	0	-2	5,92
33	B_Ancoa500	PQ	505,34	-21,45	0	-2	7,09
34	B_Nehuenco13.8	PV*	14,03	-32,73	7	0,1186	0,03
35	B_Ralco13.8	PV	14,35	7,39	5	0,6243	0,00
36	B_Canutillar220	PV	229,46	-30,27	2	-0,0104	0,00
37	B_LasVegas110	PV	109,86	-45,7	-0,6229	-0,1724	0,00
38	B_Pehuenche220	PQ	230,96	-14,75	0,39	0,1	1,35
39	B_Pangue220	PQ	231,18	1,16	3	0,8	1,72
40	B_PanAzucar220	PV	224,40	-44,18	-1	-0,3623	0,00
41	B_SanVicente154	PQ	145,10	-18,97	-2	-0,295	0,07
42	B_Ancoa220	PQ	228,55	-17,23	0	1	2,00
43	B_PuertoMontt220	PQ	227,12	-32,39	-2	-0,3368	0,21
44	B_Antuco13.8	PV	14,42	3,15	3	0,066	0,00
45	B_Esperanza220	PQ	221,55	-18,35	0	0	1,50
46	B_Rapel220	PV	229,90	-34,81	3	0,3468	0,00
47	B_Renca110	PV	112,20	-46,35	4	1	0,00
48	B_Polpaico220	PQ	220,47	-41,07	-3	-0,3873	0,88
49	B_A.Jahuel220	PQ	218,97	-39,82	-10	2	1,45
50	Quillota_110_1	PQ	110,25	-38,88	0	0	0,23
51	Quillota_110_2	PQ	110,04	-38,98	0	0	0,23
52	Quillota_12	PQ	12,14	-38,98	-0,2	-0,0406	0,03
53	B_Quillota220	PQ	223,23	-38,52	-1	-0,3667	0,46
54	Cardones_12	PQ	11,09	-43,03	0,8	-0,7406	-0,53
55	Cardones_110_1	PQ	100,71	-43,95	0	0	-4,83
56	Cardones_110_2	PQ	100,54	-43,04	0	0	-4,79
57	Valdivia_110_1	PQ	111,61	-32,91	0	0	0,18
58	Valdivia_110_2	PQ	111,40	-33	0	0	0,18
59	Valdivia_12	PQ	12,29	-33,01	-0,2	-0,0406	0,02

En la tabla anterior se puede apreciar el efecto de conectar el sub-sistema de generación eólica, como se había visto anteriormente este sistema presentaba un perfil de tensiones bajo, por lo que al instalar la barra de generación eólica (Cardones12) se empeora aún más el voltaje, en particular la barra Cardones12 al operar la generación eólica queda con una tensión de 0,924[pu] lo cual es claramente insuficiente y necesita ser corregido.

Posibles modificaciones al sistema que permitan regular la tensión de la barra Cardones12 son descritas a continuación.

- Configuración 1.

En esta configuración se utilizan solamente la capacidad de regulación de las centrales conectadas a las barras Paposo220 y Maitencillo220.

**Tabla 3-14 "Consignas de tensión Configuración1 Cardones 220"**

Barra	Central	Consigna [pu]
B_Paposo220	TalTal1	1,05
B_Maitencillo220	Guacolda	1,05
B_Maitencillo220	CER Maitencillo	1,05

**Tabla 3-15 "Flujo de potencia Configuración 1 Cardones 220"**

Busbar	Name	type	Volt[kV]	Deg[grad]	Pinj[p.u.]	Qinj[p.u.]	Dif c/r SIC sin eolica	Dif c/r solo Cardones
1	B_Cardones220	PQ	215,973	-45,85	-2,1611	-0,6195	0,43	4,61
2	B_Colbun220	PV	220	-19,95	4,0836	-0,1749	0,00	0,00
3	B_Toro13.8	SL	14,462	0	2,6482	0,6445	0,00	0,00
4	B_Concepcion220	PQ	208,66	-15,42	0	0	0,85	0,00
5	B_Trupan220	PQ	224,906	-4,58	0	0	1,49	0,00
6	B_Chena220	PQ	218,279	-42,04	0	0	0,97	0,00
7	B_Maitencillo220	PV	231	-41,73	2,2425	0,6944	4,70	4,70
8	B_CerroNavia110	PQ	111,445	-47,29	-4,3647	0,9087	0,08	0,00
9	B_S/E_Ralco220	PQ	225,72	2,38	0	0	0,56	0,00
10	B_Paposo220	PV	231	-43,04	1,2	0,0187	1,65	1,65
11	B_Antuco220	PQ	225,268	-3,47	0	0	1,08	0,00
12	B_Pehuenche13.8	PV	14,49	-10,11	4,14	0,908	0,00	0,00
13	B_LosAlmendros110	PV*	106,243	-47,68	-2,2577	-0,541	0,01	0,00
14	B_SanCristobal110	PQ	108,108	-51,2	-3,6685	0,5066	0,05	0,00
15	B_LosAlmendros220	PV	215,6	-42,13	1,15	-0,2492	0,00	0,00
16	B_Charrua154	PV	158,62	-10,17	0,713	1,3625	0,46	0,00
17	B_Charrua220	PQ	221,9	-9,65	0,6778	-0,1075	1,82	0,00
18	B_Itahue220	PQ	226,515	-17,99	-0,6	-0,37	2,05	0,00
19	B_Valdivia220	PQ	225,964	-32,56	-0,5489	-0,2241	0,37	0,00
20	B_SanIsidro13.8	PV	13,938	-35,93	1,25	0,5605	0,00	0,00
21	B_SanLuis220	PQ	222,224	-37,48	0	0	0,20	0,00
22	B_Chena110	PQ	110,193	-47,26	-3,5171	-0,0191	0,25	0,00
23	B_Hualpen154	PV	146,3	-18,5	0,5719	0,5944	0,00	0,00
24	B_DAlmagro220	PQ	224,568	-47,67	-1,3552	-0,1981	1,26	2,95
25	B_CerroNavia220	PQ	218,77	-42,17	-1,5422	-0,3126	0,78	0,00
26	B_Concepcion154	PQ	143,659	-18,86	-3,1599	-1,4835	0,22	0,00
27	B_Hualpen220	PV	213,4	-15,74	0,618	0,4227	0,00	0,00
28	B_SanPedro110	PV	110,275	-43,55	0,1087	0,6165	0,00	0,00
29	B_Quillota110	PQ	110,069	-43,36	-1,983	-0,5948	0,02	0,00
30	B_Temuco220	PV*	224,532	-28,01	-1,0113	-0,0282	1,00	0,00
31	B_A.Jahuel500	PQ	493,148	-32,43	0	-1,6351	6,60	0,02
32	B_Charrua500	PQ	504,608	-14,85	0	-1,6133	6,01	0,01
33	B_Ancoa500	PQ	504,94	-21,45	0	-2,1021	7,16	0,02
34	B_Nehuenco13.8	PV	13,8	-32,57	7,225	-0,6038	0,00	0,00
35	B_Ralco13.8	PV	14,352	7,4	5,32	0,628	0,00	0,00

36	B_Canutillar220	PV	229,46	-30,27	1,6	-0,01	0,00	0,00
37	B_LasVegas110	PV	109,857	-45,75	-0,6228	-0,1317	0,00	0,00
38	B_Pehuenche220	PQ	230,883	-14,74	0,39	0,1	1,36	0,00
39	B_Pangue220	PQ	231,144	1,17	3,42	0,8	1,75	0,00
40	B_PanAzucar220	PV*	224,561	-44,25	-1,2959	-0,6913	0,16	0,16
41	B_SanVicente154	PQ	145,096	-18,97	-1,8126	-0,295	0,07	0,00
42	B_Ancoa220	PQ	228,435	-17,22	0	1,0677	2,02	0,01
43	B_PuertoMontt220	PQ	227,119	-32,39	-1,6686	-0,3365	0,21	0,00
44	B_Antuco13.8	PV	14,421	3,16	2,7	0,0682	0,00	0,00
45	B_Esperanza220	PQ	221,515	-18,35	0	0	1,52	0,00
46	B_Rapel220	PV	229,9	-34,87	3,02	0,3908	0,00	0,00
47	B_Renca110	PV	112,2	-46,41	3,67	1,0884	0,00	0,00
48	B_Polpaico220	PQ	219,643	-41,09	-3,3008	-0,392	0,77	0,00
49	B_AJahuel220	PQ	218,618	-39,85	-9,686	1,5555	1,41	0,00
50	Quillota_110_1	PQ	109,518	-38,86	0	0	0,13	0,00
51	Quillota_110_2	PQ	109,311	-38,96	0	0	0,13	0,00
52	Quillota_12	PQ	12,057	-38,96	-0,2	-0,0406	0,01	0,00
53	B_Quillota220	PQ	221,753	-38,5	-1,1582	-0,3667	0,26	0,01
54	Cardones_12	PQ	11,452	-43,43	0,8	-0,7406	-0,27	0,26
55	Cardones_110_1	PQ	103,997	-44,29	0	0	-2,44	2,35
56	Cardones_110_2	PQ	103,83	-43,43	0	0	-2,40	2,35
57	Valdivia_110_1	PQ	111,603	-32,91	0	0	0,18	0,00
58	Valdivia_110_2	PQ	111,4	-33	0	0	0,18	0,00
59	Valdivia_12	PQ	12,288	-33	-0,2	-0,0406	0,02	0,00

Para esta configuración se utilizaron al máximo las consignas de tensión de los generadores de las barras de control disponibles y el resultado obtenido apenas es de 0,954[pu] en la barra Cardones12, por lo tanto se corrobora la hipótesis de que es necesario un dispositivo externo que permita ayudar en la regulación de tensión.

- Configuración 2.

En esta configuración se instaló un SVC en la barra Cardones220 y las tensiones adoptadas en las barras de control son las siguientes:

Tabla 3-16 "Consignas de tensión Configuración 2 Cardones220"

Barra	Central	Consigna [pu]
B_Paposo220	Ta Ta1	1,042
B_Maitencillo220	Guacolda	1,03
B_Maitencillo220	CER Maitencillo	1,03
Barra	Central o SVC	Reactivos [MVar]
B_Cardones220	SVC Cardones	137

Los resultados del flujo son:

Tabla 3-17 "Flujos de potencia Configuración 2 Cardones 220"

Busbar	Name	type	Volt[kV]	Deg[grad]	Pinj[p.u.]	Qinj[p.u.]	Dif c/r SIC sin eolica	Dif c/r solo Cardones
1	B_Cardones220	PQ	225,678	-45,94	-2,1611	0,7634	10,136	14,312
2	B_Colbun220	PV	220	-19,85	4,0836	-0,1758	0	0
3	B_Toro13.8	SL	14,462	0	2,6301	0,6414	0	0
4	B_Concepcion220	PQ	208,668	-15,38	0	0	0,855	0,01
5	B_Trupan220	PQ	224,922	-4,55	0	0	1,507	0,02
6	B_Chena220	PQ	218,289	-41,94	0	0	0,978	0,014
7	B_Maitencillo220	PV	226,6	-41,07	2,2425	-0,7467	0,3	0,3
8	B_CerroNavia110	PQ	111,446	-47,19	-4,3647	0,9087	0,083	0,001
9	B_S/E_Ralco220	PQ	225,726	2,42	0	0	0,564	0,007

10	B_Paposo220	PV	229,351	-42,46	1,2	-0,2629	0	0
11	B_Antuco220	PQ	225,28	-3,44	0	0	1,088	0,014
12	B_Pehuenche13.8	PV	14,49	-10,04	4,14	0,9044	0	0
13	B_LosAlmendros110	PV*	106,243	-47,58	-2,2577	-0,541	0,011	0
14	B_SanCristobal110	PQ	108,108	-51,1	-3,6685	0,5066	0,053	0
15	B_LosAlmendros220	PV	215,6	-42,04	1,15	-0,2534	0	0
16	B_Charrua154	PV	158,62	-10,13	0,713	1,3566	0,457	0
17	B_Charrua220	PQ	221,919	-9,61	0,6778	-0,1075	1,841	0,024
18	B_Itahue220	PQ	226,54	-17,92	-0,6	-0,37	2,071	0,03
19	B_Valdivia220	PQ	225,968	-32,51	-0,5489	-0,2241	0,372	0,005
20	B_SanSidro13.8	PV	13,938	-35,81	1,25	0,5614	0	0
21	B_SanLuis220	PQ	222,22	-37,36	0	0	0,201	0,001
22	B_Chena110	PQ	110,196	-47,16	-3,5171	-0,0191	0,255	0,004
23	B_Hualpen154	PV	146,3	-18,46	0,5719	0,5936	0	0
24	B_DAlmagro220	PQ	227,409	-47,21	-1,3552	-0,1928	4,1	5,793
25	B_CerroNavia220	PQ	218,777	-42,06	-1,5422	-0,3126	0,782	0,011
26	B_Concepcion154	PQ	143,661	-18,82	-3,1599	-1,4835	0,224	0,003
27	B_Hualpen220	PV	213,4	-15,7	0,618	0,4221	0	0
28	B_SanPedro110	PV	110,275	-43,43	0,1087	0,6172	0	0
29	B_Quillota110	PQ	110,069	-43,24	-1,983	-0,5948	0,019	0
30	B_Temuco220	PV*	224,543	-27,97	-1,0113	-0,0282	1,006	0,013
31	B_AJahuel500	PQ	493,227	-32,35	0	-1,6356	6,683	0,098
32	B_Charrua500	PQ	504,677	-14,79	0	-1,6137	6,078	0,084
33	B_Ancoa500	PQ	505,026	-21,38	0	-2,1028	7,243	0,105
34	B_Nehuenco13.8	PV	13,8	-32,45	7,225	-0,6022	0	0
35	B_Ralco13.8	PV	14,352	7,44	5,32	0,6264	0	0
36	B_Canutillar220	PV	229,46	-30,22	1,6	-0,0104	0	0
37	B_LasVegas110	PV	109,857	-45,64	-0,6228	-0,1317	0	0
38	B_Pehuenche220	PQ	230,9	-14,68	0,39	0,1	1,375	0,02
39	B_Pangue220	PQ	231,163	1,2	3,42	0,8	1,765	0,023
40	B_PanAzucar220	PV	224,4	-43,99	-1,2959	-0,4444	0	0
41	B_SanVicente154	PQ	145,096	-18,92	-1,8126	-0,295	0,068	0
42	B_Ancoa220	PQ	228,459	-17,15	0	1,0679	2,042	0,03
43	B_PuertoMontt220	PQ	227,121	-32,35	-1,6686	-0,3365	0,212	0,003
44	B_Antuco13.8	PV	14,421	3,18	2,7	0,0671	0	0
45	B_Esperanza220	PQ	221,531	-18,3	0	0	1,537	0,02
46	B_Rapel220	PV	229,9	-34,77	3,02	0,3901	0	0
47	B_Renca110	PV	112,2	-46,31	3,67	1,0868	0	0
48	B_Polpaico220	PQ	219,647	-40,98	-3,3008	-0,3919	0,772	0,009
49	B_AJahuel220	PQ	218,634	-39,76	-9,686	1,5562	1,43	0,021
50	Quillota_110_1	PQ	109,515	-38,75	0	0	0,127	0,001
51	Quillota_110_2	PQ	109,308	-38,84	0	0	0,126	0
52	Quillota_12	PQ	12,057	-38,84	-0,2	-0,0406	0,014	0
53	B_Quillota220	PQ	221,747	-38,38	-1,1582	-0,3667	0,255	0,001
54	Cardones_12	PQ	12,001	-43,72	0,8	-0,7406	0,284	0,809
55	Cardones_110_1	PQ	108,931	-44,51	0	0	2,489	7,282
56	Cardones_110_2	PQ	108,772	-43,73	0	0	2,543	7,294
57	Valdivia_110_1	PQ	111,605	-32,87	0	0	0,184	0,002
58	Valdivia_110_2	PQ	111,402	-32,96	0	0	0,184	0,002
59	Valdivia_12	PQ	12,288	-32,96	-0,2	-0,0406	0,021	0

Con esta configuración se logró corregir la tensión en la barra eólica, sin embargo los reactivos aportados por el SVC son bastantes, lo que implica que se necesita un equipo bastante potente en la zona para poder ejercer regulación de forma satisfactoria dada la dimensión del parque eólico.

### 3.4.3. Valdivia 220.

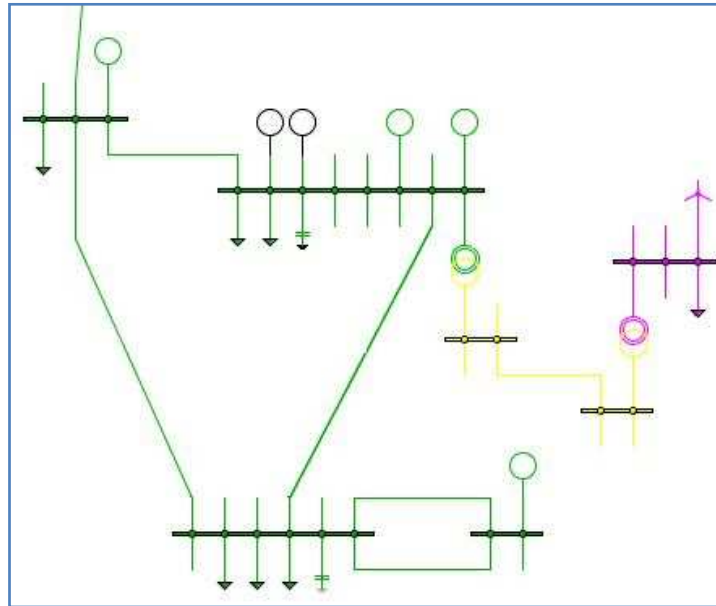


Ilustración 3-5 "Sub-sistema eólico Valdivia220"

En este caso se tiene la barra de inyección eólica inserta en un sub-sistema que presenta un nivel alto de tensiones por lo que el efecto del parque eólico es amortiguado casi en su totalidad, sin embargo al estar altas las tensiones no es mucho el rango disponible para seguir aumentando las consigas de los generadores sin llegar a límites peligrosos, el principal generador que opera en la zona cercana es la central Canutillar localizada en la barra Canutillar220; en la barra Temuco220 se encuentra la unidad Pullinque que también tiene capacidad de regulación, por último en la barra Valdivia220 se encuentran dos unidades: Capullo y Pilmaiquén, las cuales son de baja capacidad comparadas con las otras unidades, por lo que la barra Valdivia220 se comporta más como una barra PQ, es decir su tensión será impuesta por la acción de las demás barras, entonces para efectos de regulación se considerarán los reactivos que estas unidades pueden aportar. Los resultados del flujo son los siguientes.

Tabla 3-18 "Flujo de potencia caso base modificado Valdivia220"

Busbar	Name	type	Volt[kV]	Deg[grad]	Pinj[p.u.]	Qinj[p.u.]	Dif c/r SIC sin eólica
1	B_Cardones220	PQ	213,73	-55,92	-2,1611	-0,6205	0
2	B_Colbun220	PV	220	-23,98	4,0836	-0,1225	0
3	B_Toro13.8	SL	14,462	0	2,7646	0,7357	0
4	B_Concepcion220	PQ	208,277	-15,77	0	0	0,425
5	B_Trupan220	PQ	224,286	-4,78	0	0	0,816
6	B_Chena220	PQ	217,757	-46,43	0	0	0,1
7	B_Maitencillo220	PV	224,4	-60,87	2,2425	0,0583	0
8	B_CerroNavia110	PQ	111,407	-51,82	-4,3647	0,9062	0,009
9	B_S/E_Ralco220	PQ	225,453	2,13	0	0	0,266
10	B_Paposo220	PV	228,8	-66,04	1,2	0,0309	0
11	B_Antuco220	PQ	224,832	-3,62	0	0	0,601
12	B_Pehuenche13.8	PV	14,49	-12,03	4,14	1,1428	0
13	B_LosAlmendros110	PV*	106,238	-51,96	-2,2579	-0,5419	0,003
14	B_SanCristobal110	PQ	108,075	-55,63	-3,6686	0,5005	0,007
15	B_LosAlmendros220	PV	215,6	-46,33	1,15	0,0132	0
16	B_Charrua154	PV	158,62	-10,47	0,713	1,6288	0,419
17	B_Charrua220	PQ	221,026	-9,94	0,6778	-0,1075	0,868
18	B_Itahue220	PQ	224,927	-19,96	-0,6	-0,37	0,328

19	B_Valdivia220	PQ	222,23	-17,24	-0,5489	-0,2241	-3,371
20	B_SanSidro13.8	PV	13,938	-41,58	1,2497	0,2935	0
21	B_SanLuis220	PQ	223,516	-43,13	-0,0003	-0,0001	0,048
22	B_Chena110	PQ	110,063	-51,74	-3,5171	-0,0221	0,027
23	B_Hualpen154	PV	146,3	-18,86	0,5719	0,6314	0
24	B_DAlmagro220	PQ	222,213	-55,76	-1,3552	-0,2025	0
25	B_CerroNavia220	PQ	218,462	-46,69	-1,5422	-0,3126	0,084
26	B_Concepcion154	PQ	143,573	-19,21	-3,1599	-1,4835	0,124
27	B_Hualpen220	PV	213,4	-16,1	0,618	0,4514	0
28	B_SanPedro110	PV*	110,349	-48,96	0,1086	0,5141	0,015
29	B_Quillota110	PQ	110,188	-48,8	-1,983	-0,5949	0,017
30	B_Temuco220	PV*	224,958	-18,29	-1,0113	-0,0285	1,398
31	B_A.Jahuel500	PQ	487,921	-35,74	0	-1,6004	0,71
32	B_Charrua500	PQ	500,56	-15,89	0	-1,5871	1,637
33	B_Ancoa500	PQ	499,393	-23,48	0	-2,0559	1,145
34	B_Nehuenco13.8	PV*	14,002	-38,31	7,226	0,1189	0,003
35	B_Ralco13.8	PV	14,352	7,16	5,32	0,7003	0
36	B_Canutillar220	PV	229,46	-15,62	1,6	0,287	0
37	B_LasVegas110	PV	109,857	-50,92	-0,6229	-0,142	0
38	B_Pehuenche220	PQ	229,829	-16,68	0,39	0,1	0,218
39	B_Pangue220	PQ	230,415	0,98	3,42	0,8	0,951
40	B_PanAzucar220	PV	224,4	-59,07	-1,296	-0,1531	0
41	B_SanVicente154	PQ	145,069	-19,33	-1,8126	-0,295	0,038
42	B_Ancoa220	PQ	226,868	-19,18	0	1,053	0,324
43	B_PuertoMontt220	PQ	225,524	-17,66	-1,6686	-0,3391	-1,387
44	B_Antuco13.8	PV	14,421	3,01	2,7	0,1138	0
45	B_Esperanza220	PQ	223,52	-13,95	0	0	3,47
46	B_Rapel220	PV	229,9	-39,41	3,02	0,422	0
47	B_Renca110	PV	112,2	-50,94	3,6699	1,1678	0
48	B_Polpaico220	PQ	219,685	-45,95	-3,3009	-0,3917	0,088
49	B_A.Jahuel220	PQ	217,674	-43,95	-9,686	1,517	0,15
50	Quillota_110_1	PQ	110,044	-44,49	0	0	0,026
51	Quillota_110_2	PQ	109,839	-44,58	0	0	0,026
52	Quillota_12	PQ	12,115	-44,59	-0,2	-0,0406	0,003
53	B_Quillota220	PQ	222,816	-44,13	-1,1583	-0,3667	0,052
54	Cardones_12	PQ	11,618	-55,41	-0,2	-0,0406	0
55	Cardones_110_1	PQ	105,544	-55,31	0	0	0
56	Cardones_110_2	PQ	105,33	-55,41	0	0	0
57	Valdivia_110_1	PQ	107,179	-15,77	0	0	-4,245
58	Valdivia_110_2	PQ	107,018	-14,96	0	0	-4,203
59	Valdivia_12	PQ	11,803	-14,96	0,8	-0,7406	-0,465

Al observar la barra de inyección eólica Valdivia\_12 se aprecia que la tensión está en 0,98[pu], lo cual es bastante bueno ya que no se está efectuando ningún tipo de medida de control de voltaje, esto como se dijo anteriormente se debe a que el sistema ya presentaba un perfil alto de tensiones previo a la instalación de la barra eólica.

Al tratar de corregir la tensión en la barra Valdivia\_12 se propusieron dos configuraciones.

- Configuración 1.

Para el control de tensión en esta zona se dispone de dos barras que efectúan regulación mediante el cambio de consignas de voltaje y una barra que controla la inyección de reactivos por parte de las unidades de generación conectadas a ella.

Tabla 3-19 "Consignas de tensión Configuración 1 Valdivia220"

Barra	Central	Consigna [pu]
B_Canutillar220	Pullinque	1,05
B_Temuco220	Guacolda	1,04

Barra	Central o SVC	Reactivos [MVar]
B_Valdivia220	Capullo, Pilmaiquén	11

Tabla 3-20 "Flujo de potencia Configuración 1 Valdivia220"

Busbar	Name	type	Volt[kV]	Deg[grad]	Pinj[p.u.]	Qinj[p.u.]	Dif c/r sin eolica	Dif c/r solo Valdivia
1	B_Cardones220	PQ	215,542	-55,02	-2,1611	-0,6197	0	0
2	B_Colbun220	PV	220	-23,99	4,0836	-0,1064	0	0
3	B_Toro13.8	SL	14,462	0	2,7653	0,7249	0	0
4	B_Concepcion220	PQ	208,327	-15,76	0	0	0,514	0,071
5	B_Trupan220	PQ	224,366	-4,78	0	0	0,951	0,112
6	B_Chena220	PQ	217,428	-46,47	0	0	0,117	0,017
7	B_Maitencillo220	PV	226,3	-61,13	2,2425	0,1746	0	0
8	B_CerroNavia110	PQ	111,373	-51,87	-4,3647	0,9058	0,01	0,002
9	B_S/E_Ralco220	PQ	225,488	2,13	0	0	0,326	0,049
10	B_Paposo220	PV	229,351	-66,09	1,2	-0,0041	0	0
11	B_Antuco220	PQ	224,888	-3,62	0	0	0,696	0,079
12	B_Pehuenche13.8	PV	14,49	-12,02	4,14	1,1502	0	0
13	B_LosAlmendros110	PV*	106,235	-52,01	-2,2577	-0,541	0,003	0
14	B_SanCristobal110	PQ	108,063	-55,68	-3,6685	0,5054	0,008	0,001
15	B_LosAlmendros220	PV	215,6	-46,38	1,15	0,0902	0	0
16	B_Charrua154	PV	158,62	-10,47	0,713	1,5937	0,457	0
17	B_Charrua220	PQ	221,141	-9,94	0,6778	-0,1075	1,063	0,161
18	B_Itahue220	PQ	224,877	-19,95	-0,6	-0,37	0,408	0,061
19	B_Valdivia220	PQ	225,595	-17,26	-0,5489	-0,1241	-0,001	3,372
20	B_SanSidro13.8	PV	13,938	-41,55	1,25	0,5972	0	0
21	B_SanLuis220	PQ	222,047	-43,1	0	0	0,028	0,004
22	B_Chena110	PQ	109,972	-51,78	-3,5171	-0,0234	0,031	0,005
23	B_Hualpen154	PV	146,3	-18,85	0,5719	0,6265	0	0
24	B_DAlmagro220	PQ	223,309	-55,79	-1,3552	-0,2004	0	0
25	B_CerroNavia220	PQ	218,09	-46,73	-1,5422	-0,3126	0,095	0,015
26	B_Concepcion154	PQ	143,585	-19,2	-3,1599	-1,4835	0,148	0,016
27	B_Hualpen220	PV	213,4	-16,09	0,618	0,4476	0	0
28	B_SanPedro110	PV	110,275	-49	0,1087	0,6468	0	0
29	B_Quillota110	PQ	110,052	-48,83	-1,983	-0,5948	0,002	0
30	B_Temuco220	PV*	228,785	-18,32	-1,0113	0,1066	5,248	3,847
31	B_AJahuel500	PQ	487,432	-35,75	0	-1,5969	0,888	0,133
32	B_Charrua500	PQ	500,633	-15,89	0	-1,5871	2,034	0,307
33	B_Ancoa500	PQ	499,22	-23,47	0	-2,0538	1,437	0,215
34	B_Nehuenco13.8	PV	13,8	-38,18	7,225	-0,5362	0	0
35	B_Ralco13.8	PV	14,352	7,15	5,32	0,6907	0	0
36	B_Canutilar220	PV	231	-15,55	1,6	0,1108	1,54	1,54
37	B_LasVegas110	PV	109,857	-50,96	-0,6228	-0,1253	0	0
38	B_Pehuenche220	PQ	229,796	-16,67	0,39	0,1	0,271	0,041
39	B_Pangue220	PQ	230,508	0,98	3,42	0,8	1,11	0,131
40	B_PanAzucar220	PV	224,4	-53,23	-1,2959	-0,2175	0	0
41	B_SanVicente154	PQ	145,073	-19,31	-1,8126	-0,295	0,045	0,005
42	B_Ancoa220	PQ	226,819	-19,17	0	1,0524	0,402	0,061
43	B_PuertoMontt220	PQ	228,022	-17,62	-1,6686	-0,3355	1,113	2,501
44	B_Antuco13.8	PV	14,421	3,01	2,7	0,108	0	0
45	B_Esperanza220	PQ	225,37	-14	0	0	5,376	1,885
46	B_Rapel220	PV	229,9	-39,46	3,02	0,4596	0	0
47	B_Renca110	PV	112,2	-50,99	3,67	1,2367	0	0
48	B_Polpaico220	PQ	218,967	-45,97	-3,3008	-0,3957	0,092	0,013
49	B_AJahuel220	PQ	217,383	-43,98	-9,686	1,5062	0,179	0,027
50	Quillota_110_1	PQ	109,406	-44,48	0	0	0,018	0,003
51	Quillota_110_2	PQ	109,199	-44,58	0	0	0,017	0,003
52	Quillota_12	PQ	12,045	-44,58	-0,2	-0,0406	0,002	0
53	B_Quillota220	PQ	221,527	-44,12	-1,1582	-0,3667	0,035	0,006
54	Cardones_12	PQ	11,717	-55,51	-0,2	-0,0406	0	0
55	Cardones_110_1	PQ	106,442	-55,41	0	0	0	0
56	Cardones_110_2	PQ	106,229	-55,51	0	0	0	0
57	Valdivia_110_1	PQ	108,889	-15,83	0	0	-2,532	1,713
58	Valdivia_110_2	PQ	108,73	-15,05	0	0	-2,488	1,716
59	Valdivia_12	PQ	11,992	-15,05	0,8	-0,7406	-0,275	0,189

Con la configuración adoptada se pudo dejar la tensión en la barra Valdivia12 en su valor nominal, a pesar que antes de efectuar el control el voltaje era aceptable, sin embargo como se dijo anteriormente los controladores PV se encuentran casi en su límite en cuanto a tensión, por lo que la acción de la barra PQ en este sistema es fundamental.

- Configuración 2.

En esta configuración se privilegió el uso de los reactivos de la barra Valdivia220 para dejar así con un mejor margen de tensión a las barras PV.

Tabla 3-21 "Consignas de tensión Configuración 2 Valdivia220"

Barra	Central	Consigna [pu]
B_Canutillar220	Pullinque	1,05
B_Temuco220	Guacolda	1,04
Barra	Central o SVC	Reactivos [MVar]
B_Valdivia220	Capullo, Pilmaiquén	37

Tabla 3-22 "Flujo de potencia Configuración 2 Valdivia220"

Busbar	Name	type	Volt[kV]	Deg[grad]	Pinj[p.u.]	Qinj[p.u.]	Dif c/r sin eolica	Dif c/r solo Valdivia
1	B_Cardones220	PQ	215,542	-55,04	-2,1611	-0,6197	0	0
2	B_Colbun220	PV	220	-24,01	4,0836	-0,1055	0	0
3	B_Toro13.8	SL	14,462	0	2,7632	0,7333	0	0
4	B_Concepcion220	PQ	208,287	-15,76	0	0	0,474	0,031
5	B_Trupan220	PQ	224,304	-4,78	0	0	0,889	0,05
6	B_Chena220	PQ	217,419	-46,48	0	0	0,108	0,008
7	B_Maitencillo220	PV	226,3	-61,15	2,2425	0,1746	0	0
8	B_CerroNavia110	PQ	111,372	-51,88	-4,3647	0,9057	0,009	0,001
9	B_S/E_Ralco220	PQ	225,46	2,14	0	0	0,298	0,021
10	B_Paposo220	PV	229,351	-66,11	1,2	-0,0041	0	0
11	B_Antuco220	PQ	224,844	-3,62	0	0	0,652	0,035
12	B_Pehuenche13.8	PV	14,49	-12,02	4,14	1,1552	0	0
13	B_LosAlmendros110	PV*	106,235	-52,03	-2,2577	-0,541	0,003	0
14	B_SanCristobal110	PQ	108,062	-55,7	-3,6685	0,5054	0,007	0
15	B_LosAlmendros220	PV	215,6	-46,39	1,15	0,0942	0	0
16	B_Charrua154	PV	158,62	-10,47	0,713	1,6213	0,457	0
17	B_Charrua220	PQ	221,051	-9,94	0,6778	-0,1075	0,973	0,071
18	B_Itahue220	PQ	224,843	-19,96	-0,6	-0,37	0,374	0,027
19	B_Valdivia220	PQ	225,502	-17,34	-0,5489	0,1459	-0,094	3,279
20	B_SanIsidro13.8	PV	13,938	-41,56	1,25	0,5977	0	0
21	B_SanLuis220	PQ	222,044	-43,12	0	0	0,025	0,001
22	B_Chena110	PQ	109,969	-51,8	-3,5171	-0,0234	0,028	0,002
23	B_Hualpen154	PV	146,3	-18,86	0,5719	0,6303	0	0
24	B_DAlmagro220	PQ	223,309	-55,81	-1,3552	-0,2004	0	0
25	B_CerroNavia220	PQ	218,082	-46,74	-1,5422	-0,3126	0,087	0,007
26	B_Concepcion154	PQ	143,576	-19,2	-3,1599	-1,4835	0,139	0,007
27	B_Hualpen220	PV	213,4	-16,1	0,618	0,4506	0	0
28	B_SanPedro110	PV	110,275	-49,01	0,1087	0,6472	0	0
29	B_Quillota110	PQ	110,052	-48,84	-1,983	-0,5948	0,002	0
30	B_Temuco220	PV	226,6	-18,28	-1,0113	-0,0415	3,063	1,662
31	B_A.Jahuel500	PQ	487,359	-35,77	0	-1,5964	0,815	0,06
32	B_Charrua500	PQ	500,462	-15,89	0	-1,586	1,863	0,136
33	B_Ancoa500	PQ	499,101	-23,48	0	-2,0528	1,318	0,096
34	B_Nehuenco13.8	PV	13,8	-38,2	7,225	-0,5353	0	0
35	B_Ralco13.8	PV	14,352	7,16	5,32	0,6982	0	0
36	B_Canutillar220	PV	228,8	-15,47	1,6	-0,0605	-0,66	-0,66
37	B_LasVegas110	PV	109,857	-50,98	-0,6228	-0,1252	0	0
38	B_Pehuenche220	PQ	229,773	-16,68	0,39	0,1	0,248	0,018
39	B_Panguel220	PQ	230,435	0,99	3,42	0,8	1,037	0,058



40	B_PanAzucar220	PV	224,4	-56,25	-1,2959	-0,2174	0	0
41	B_SanVicente154	PQ	145,07	-19,32	-1,8126	-0,295	0,042	0,002
42	B_Ancoa220	PQ	226,785	-19,17	0	1,0521	0,368	0,027
43	B_PuertoMontt220	PQ	226,727	-17,62	-1,6686	-0,3374	-0,182	1,206
44	B_Antuco13.8	PV	14,421	3,01	2,7	0,1125	0	0
45	B_Esperanza220	PQ	224,304	-13,96	0	0	4,31	0,819
46	B_Rapel220	PV	229,9	-39,47	3,02	0,4604	0	0
47	B_Renca110	PV	112,2	-51	3,67	1,2385	0	0
48	B_Polpaico220	PQ	218,96	-45,98	-3,3008	-0,3957	0,085	0,006
49	B_A.Jahuel220	PQ	217,368	-43,99	-9,686	1,5056	0,164	0,012
50	Quillota_110_1	PQ	109,404	-44,5	0	0	0,016	0,001
51	Quillota_110_2	PQ	109,198	-44,6	0	0	0,016	0,002
52	Quillota_12	PQ	12,045	-44,6	-0,2	-0,0406	0,002	0
53	B_Quillota220	PQ	221,524	-44,13	-1,1582	-0,3667	0,032	0,003
54	Cardones_12	PQ	11,717	-55,53	-0,2	-0,0406	0	0
55	Cardones_110_1	PQ	106,442	-55,42	0	0	0	0
56	Cardones_110_2	PQ	106,229	-55,53	0	0	0	0
57	Valdivia_110_1	PQ	108,842	-15,91	0	0	-2,579	1,666
58	Valdivia_110_2	PQ	108,683	-15,13	0	0	-2,535	1,669
59	Valdivia_12	PQ	11,987	-15,12	0,8	-0,7406	-0,28	0,184

Con esta configuración también se logro dejar el voltaje de la barra de inyección eólica en su valor nominal, no obstante se realizo un mayor uso de los reactivos que aportan las unidades de la barra Valdivia 220.

Al analizar los resultados de las distintas acciones de control efectuadas sobre los sub-sistemas Quillota; Cardones y Valdivia se puede concluir que es posible mediante el uso de los recursos del sistema regular el voltaje de las barras de inyección eólica, los generadores del sistema que son utilizados para la regulación de tensión se dividen en los que imponen la tensión en sus barras (barras PV) y en los que su tensión es definida por la red y donde se solo se puede configurar el nivel de reactivos aportados (barras PQ), estas definiciones son necesarias desde un punto de vista numérico, ya que para poder realizar los flujos de potencia se deben configurar las barras de acuerdo a este criterio.

Por otro lado para efectuar la regulación de tensión es necesario gestionar los recursos del sistema de una manera eficiente, ya que existen restricciones de capacidad propias de las máquinas (limites de potencia activa y reactiva) y también restricciones en la calidad de suministro de la tensión (rangos de voltaje)

# Capítulo 4

## Planteamiento Teórico.

Para establecer las consignas de tensión y/o el aporte reactivo de los generadores pertenecientes a las barras controladoras, con el fin de regular el voltaje de la barra de inyección eólica, se propone un método de optimización el cual minimiza el esfuerzo de control que cada unidad debe aportar para lograr la regulación.

### 4.1.Modelo.

El modelo consiste en la minimización de una función objetivo que representa el esfuerzo de control de las barras de generación, mientras que las restricciones asociadas a la optimización representan los límites permitidos de esfuerzo que cada una de las barras pueden efectuar.

#### 4.1.1. La función objetivo.

La función objetivo está compuesta por la suma cuadrática de las variaciones de voltaje de las barras PV más la suma cuadrática de las variaciones de inyección reactiva de las barras PQ, cada una de estas variaciones tiene asociado un peso, estos pesos son los que en definitiva definen el criterio de regulación de tensión.

$$fo = \sum_i \Delta V_i^2 \cdot \alpha_i + \sum_j \Delta Q_j^2 \cdot \beta_j$$

Donde:

$fo$  = Función Objetivo.

$\Delta V_i$  = Variación de voltaje de la barra  $PV_i$ .

$\Delta Q_j$  = Variación de inyección de reactivos de la barra  $PQ_j$ .

$\alpha_i$  = Peso asociado a la barra  $PV_i$ .

$\beta_j$  = Peso asociado a la barra  $PQ_j$ .

#### 4.1.2. Restricciones.

Las restricciones de esta optimización están asociadas en primer lugar a la variación de tensión que se requiere en la barra de inyección eólica de manera de lograr el efecto deseado, este requerimiento se modeló como una restricción de igualdad.

$$\Delta V(Q) = \sum_i f_i(\Delta V_i) + \sum_j h_j(\Delta Q_j)$$

Donde:

$$\Delta V(Q)$$

= *Variación de tensión necesaria en la barra eólica en función de los reactivos absorbidos.*

$f_i(\Delta V_i)$  = *Función que representa la influencia del voltaje de la Barra PV<sub>i</sub> con respecto a la tensión de la barra eólica.*

$h_j(\Delta Q_j)$  = *Función que representa la influencia de los reactivos de la Barra PQ<sub>j</sub> con respecto a la tensión de la barra eólica.*

El segundo tipo de restricciones son las asociadas a la capacidad que tienen las máquinas conectadas a las barras controladoras, ya que estas tienen que cumplir requerimientos de calidad y seguridad de servicio mínimos y porque tienen restricciones técnicas propias que restringen su rango de control [3][5][14].

$$\begin{aligned}\Delta V_{min_i} &\leq \Delta V_i \leq \Delta V_{max_i} \\ \Delta Q_{min_j} &\leq \Delta Q_j \leq \Delta Q_{max_j}\end{aligned}$$

Donde:

$\Delta V_{min_i}$  = *Variación de tensión mínima en la barra PV<sub>i</sub>.*

$\Delta V_{max_i}$  = *Variación de tensión máxima en la barra PV<sub>i</sub>.*

$\Delta Q_{min_j}$  = *Variación de reactivos mínima en la barra PQ<sub>j</sub>.*

$\Delta Q_{max_j}$  = *Variación de reactivos máxima en la barra PQ<sub>j</sub>.*

Por lo tanto el problema de optimización queda definido como:

$$\min(f_o) = \sum_i \Delta V_i^2 \cdot \alpha_i + \sum_j \Delta Q_j^2 \cdot \beta_j$$

s. a.

$$\begin{aligned}\Delta V(Q) &= \sum_i f_i(\Delta V_i) + \sum_j h_j(\Delta Q_j) \\ \Delta V_{min_i} &\leq \Delta V_i \leq \Delta V_{max_i} \\ \Delta Q_{min_j} &\leq \Delta Q_j \leq \Delta Q_{max_j}\end{aligned}$$

Para aplicar este método en un sistema eléctrico es necesario establecer la barra donde se conectarán las unidades de generación eólica, ubicar las barras de generación cercanas que pueden aportar en la regulación de tensión y determinar las funciones de influencias de las barras controladoras (barra PV y PQ) con respecto a la barra de generación eólica. Por último se deben establecer los pesos de la función objetivo de manera que el aporte de control de cada barra sea consistente con algún criterio predefinido, es decir, que el control efectuado por cada barra responda a una estrategia específica la cual puede establecer prioridades en cuanto al aporte que cada barra efectúe.

# Capítulo 5

## Aplicación Casos de estudio.

### 5.1. Metodología.

Dado que los casos de estudios ya están establecidos la metodología para aplicar el planteamiento teórico es:

- Obtener las funciones de influencia, de acuerdo a las barras de generación identificadas, realizando análisis de sensibilidad. Los análisis de sensibilidad se realizan variando el voltaje o los reactivos según corresponda de la barra controladora y registrando el efecto en la tensión de la barra controlada (barra de generación eólica), al analizar estos datos se puede establecer la naturaleza de las funciones de influencia.

$$f_i(\Delta V_i) = \frac{\Delta V_i}{\Delta V(Q)}$$
$$h_j(\Delta Q_j) = \frac{\Delta Q_j}{\Delta V(Q)}$$

Por lo general la naturaleza de las funciones de influencias es de carácter lineal, por lo que para modelarlas se realizarán regresiones lineales a las series de datos obtenidos con los análisis de sensibilidad, estableciendo el factor de correlación de la aproximación y entregando los coeficientes que representan las funciones.

- Determinar los niveles mínimos y máximos de tensión en las barras controladoras PV y la capacidad de aporte de reactivos de las barras PQ.
- Determinar los niveles de tensión en la barra de generación eólica en función de posibles escenarios de absorción de reactivos.

$$V_{Eolico} = f(Q_i); Q_i = \text{Reactivos absorbidos}$$

- Plantear los pesos de la función objetivo de acuerdo a un criterio predefinido.

## 5.2.Cardones220.

La zona de Cardones está caracterizada por tener un déficit de reactivos, por lo tanto para lograr tener capacidad de control de tensión en la barra de generación eólica se instaló un SVC en la barra Cardones220, este dispositivo en la optimización será tratado como un generador que solo inyecta potencia reactiva, considerando así la barra Cardones 220 como una barra PQ.

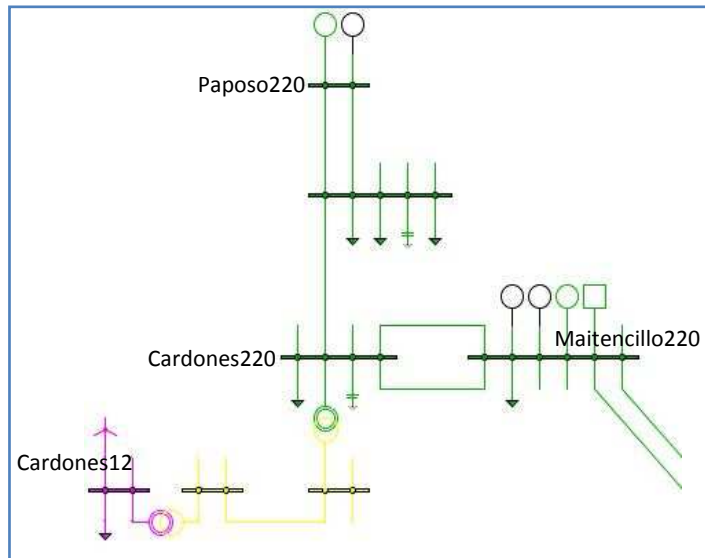


Ilustración 5-1 "Sub-sistema Cardones220"

Para realizar el análisis de las funciones de influencias se estableció primero un estado inicial en el sistema, el cual se construyó de acuerdo a las características del modelo original del SIC y para un nivel establecido en la inyección de potencia de la barra de generación eólica. Este estado inicial se describe en la siguiente tabla.

Tabla 5-1 "Características barras controladoras"

Tipo de Barra	Nombre	Tensión [pu]	Reactivos[MVAr]
PV Controladora	B_Paposo	1,04	-
PV Controladora	B_Maitencillo	1,02	-
PQ Controladora	B_Cardones220	-	0

Para esta configuración la tensión obtenida en la barra de generación eólica es:

Tabla 5-2 "Datos barra controlada"

Tipo de Barra	Nombre	Tensión [pu]	Reactivos Absorbidos[MVAr]	Potencia Activa[MW]
PQ Controlada	Cardones12	0,924	70	100

### 5.2.1. Funciones de Influencia.

Para obtener las funciones de influencias se realizaron flujos de potencia con distintos niveles en las tensiones y en los reactivos de las barras controladoras PV y PQ respectivamente, para el caso de las tensiones las variaciones fueron en términos porcentuales del valor establecido en el estado inicial, mientras que para los reactivos aportados por las barras PQ las variaciones se hicieron para valores fijos de potencia reactiva.

Tabla 5-3 "Datos funciones de influencia Cardones 220"

Porcentaje de variación de tensión	Variación de Tensión resultante en Paposo220 [kV]	Función de influencia 1: Variación de tensión Cardones12[kV]	Variación de Tensión resultante en Maitencillo220 [kV]	Función de influencia 2: Variación de tensión Cardones12[kV]
-5%	-11,440000	-0,168	-11,220000	-0,572
-4%	-9,152000	-0,134	-8,976000	-0,456
-3%	-6,864000	-0,1	-6,732000	-0,341
-2%	-4,576000	-0,067	-4,488000	-0,227
-1%	-2,288000	-0,033	-2,244000	-0,113
1%	2,288000	0,034	2,244000	0,114
2%	4,576000	0,067	4,488000	0,226
3%	6,864000	0,101	6,732000	0,338
4%	9,152000	0,134	8,976000	0,45
5%	11,440000	0,167	11,220000	0,562

Al analizar los datos obtenidos se aprecia que los valores de las funciones de influencias son directamente proporcionales a las variaciones de tensión en las barras controladoras.

Para la función de influencia 1 (variación de tensión de la barra eólica con respecto a la tensión en Barra Paposo220) se obtuvo la siguiente aproximación lineal:

$$f_1(\Delta V_{Paposo}) = 0,0146 \cdot \Delta V_{Paposo} + 0,0001$$

Con un factor de correlación:  $r = 0,999994$

El cual indica la validez de suponer la función de influencia  $f_1$  como una recta.

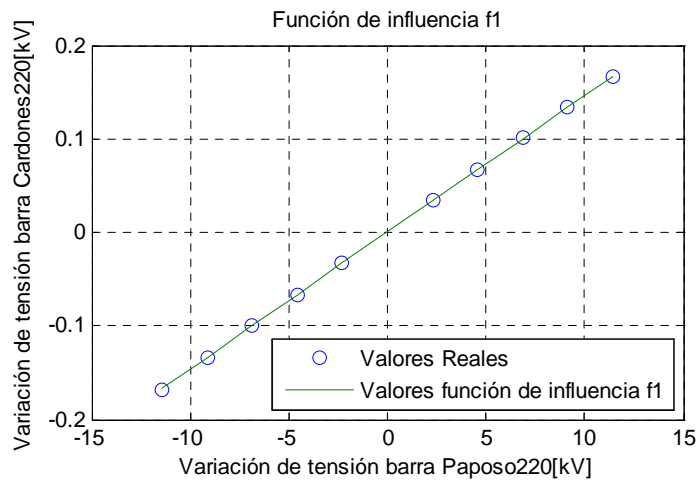


Ilustración 5-2 "Función de influencia f1 Cardones"

Para la función de influencia f2 (variación de tensión en Cardones12 en función de la variación de tensión de Maitencillo220) la aproximación lineal encontrada es:

$$f_2(\Delta V_{Maitencillo}) = 0,0505 \cdot \Delta V_{Maitencillo} - 0,0019$$

Con un factor de correlación:  $r = 0,999986$

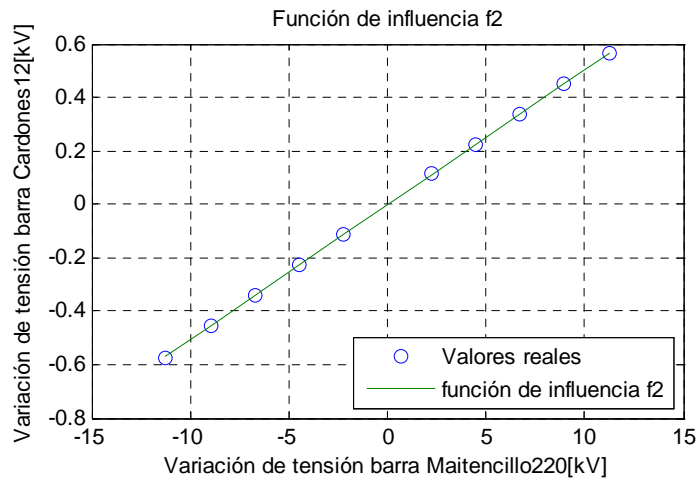


Ilustración 5-3 "Función de influencia f2 Cardones"

Dada la pendiente de la recta que aproxima la función de influencia se puede notar que la influencia de Maitencillo220 sobre el nudo de inyección de energía eólica es mayor que la de Paposo220.

Para el caso de la barra Cardones 220 donde hay instalado un SVC la función de influencia está dada por los siguiente valores obtenidos del análisis de sensibilidad.

Tabla 5-4 "Datos función de influencia h1 Cardones"

Variación Reactivos Cardones220 [MVar]	Función de influencia 1: Variación de tensión Cardones12[kV]
25	0,155
50	0,304

75	0,45
100	0,591
125	0,73
150	0,864
175	0,996
200	1,125

La aproximación de la función de influencia en este caso resulta

$$h_1(\Delta Q_{SVC_{Cardones220}}) = 0,0055 \cdot \Delta Q_{SVC_{Cardones220}} + 0,0288$$

Con un factor de correlación:  $r = 0,9997$

Por lo tanto para este caso también es válido asumir una recta como la función de influencia de la tensión en la barra eólica en función de los reactivos aportados por el SVC localizado en Cardones220.

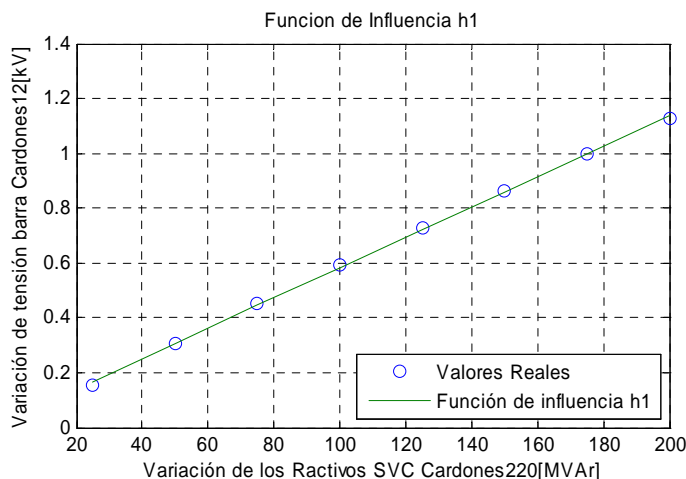


Ilustración 5-4 "Función de influencia h1 Cardones"

### 5.2.2. Restricciones.

Para obtener las restricciones de la optimización se baso en las tensiones configuradas en el estado inicial y en los rangos que establece la NTSySC [5] mientras que para los reactivos del SVC se estableció un rango fijo de capacidad, por lo tanto los máximos valores de variación de tensión y reactivos para las barras controladoras son:

Tabla 5-5 "Restricciones Cardones"

Barra	Tensión inicial [pu]	$\Delta V$ min [kV]	$\Delta V$ máx. [kV]
PV Paposos220	1,04	-19,8	2,2
PV Maitencillo220	1,02	-15,4	6,6
	Reactivos inicial [MVar]	$\Delta Q$ min [MVar]	$\Delta Q$ máx. [MVar]
PQ Cardones220	0	-200	200

Los rangos de potencia reactiva del SVC fueron establecidos de forma genérica sin ningún análisis detallado, ya que solo se desea ejemplificar el procedimiento.



Por otro lado se debe obtener el perfil de tensiones para un escenario dado de absorción de reactivos por parte de las unidades eólicas, es decir, tener una parametrización del efecto sobre el voltaje producto de los reactivos consumidos por los aerogeneradores

Tabla 5-6 "Tensiones en función de reactivos absorbidos Cardones"

Reactivos absorbidos [MVar]	Tensión Cardones12[kV]	$\Delta$ Tensión Cardones12[kV]
0	11,898	0,102
7	11,822	0,178
14	11,746	0,254
21	11,668	0,332
28	11,589	0,411
35	11,509	0,491
42	11,428	0,572
49	11,345	0,655
56	11,261	0,739
63	11,175	0,825
70	11,088	0,912
77	11	1
84	10,91	1,09
91	10,818	1,182
98	10,724	1,276
105	10,628	1,372

Al linealizar la variación de tensión en la barra eólica en función de los reactivos absorbidos se obtiene la siguiente expresión.

$$\Delta V(\Delta Q) = 0,0786 + 0,0121 \cdot \Delta Q$$

Con una correlación:  $r = 0,9994$

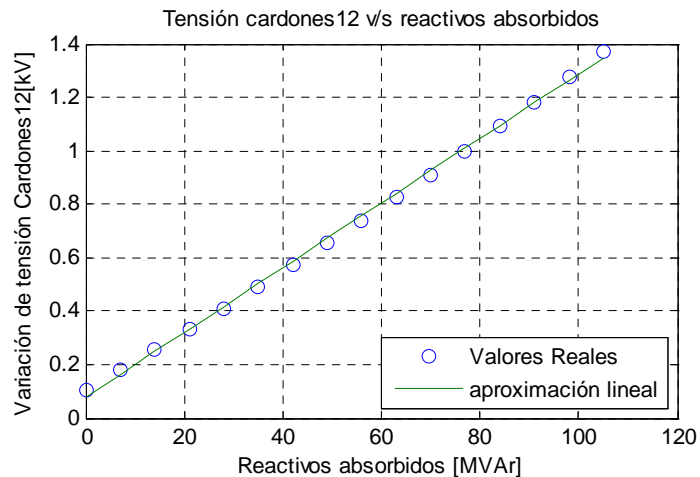


Ilustración 5-5 "Tensión en función de reactivos absorbidos Cardones"

### 5.2.3. Sistema optimización.

Con los resultados anteriores es posible plantear el sistema de minimización.

$$\begin{aligned} \min(f_0) &= \Delta V_{Paposo}^2 \cdot \alpha_1 + \Delta V_{Maitencillo}^2 \cdot \alpha_2 + \Delta Q_{SVC-Cardones220}^2 \cdot \beta_1 \\ \text{s. a.} \\ \Delta V(\Delta Q) &= f_1(\Delta V_{Paposo}) + f_2(\Delta V_{Maitencillo}) + h_1(\Delta Q_{SVC-Cardones220}) \\ -19,8 &\leq \Delta V_{Paposo220} \leq 2,2 \\ -15,4 &\leq \Delta V_{Maitencillo220} \leq 6,6 \\ -200 &\leq \Delta Q_{Cardones220} \leq 200 \end{aligned}$$

Por lo tanto con este sistema se puede obtener el perfil de tensiones y las inyecciones de reactivos de las barras controladoras PV y PQ para distintos escenarios de absorción de reactivos, solo basta con definir el criterio de regulación de tensión.

Al definir el criterio de tensión para este caso se estudió el efecto que tiene el restringir el aporte del SVC y ver como esto afecta al uso de la capacidad de los generadores que operan como barras controladoras PV.

Para esto se configuró un proceso iterativo con doce casos donde se va variando el peso de la Barra Cardones220 de manera lineal manteniendo los pesos de Paposo220 y Maitencillo220, para cada uno de los casos se realizó una optimización del sistema obteniendo así un perfil de tensiones y de reactivos usados.

Los Pesos usados para Paposo220 y Maitencillo220 fueron respectivamente:  $a_1 = 10$ ,  $a_2 = 10$ , mientras que los pesos de Cardones220 fueron:  $b_1 = 40 \cdot k$ , donde  $k$  es el índice de la iteración respectiva. Los resultados de todos los casos están tabulados y graficados en los anexos B.1 y A.1 respectivamente, a continuación se muestra un figura resumen de los casos estudiados.

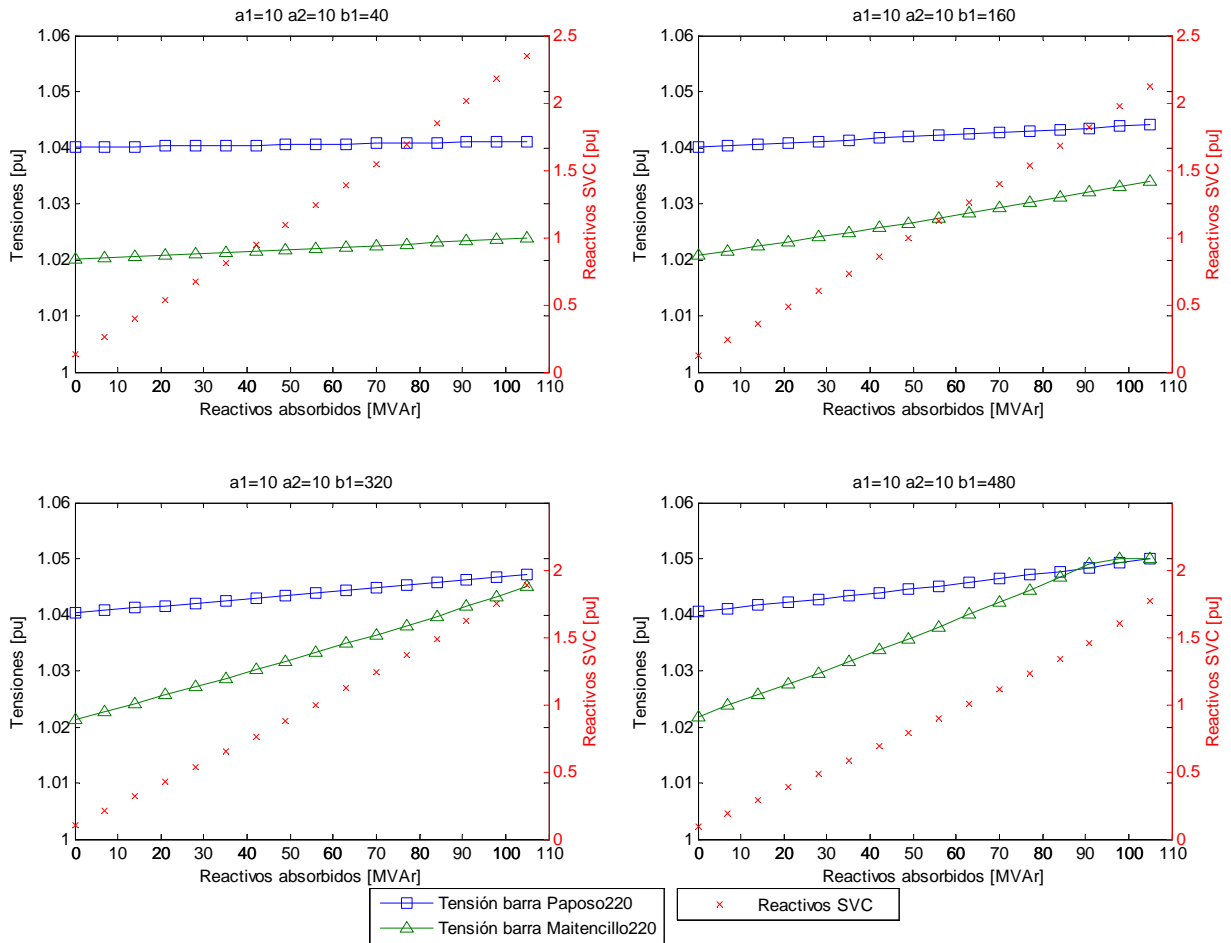


Ilustración 5-6 "Perfil de tensiones para distintas combinaciones de pesos"

En la figura anterior se muestran cuatro casos distintos de combinaciones de pesos, se puede apreciar que mientras mayor es el peso asociado a la variación de reactivos ( $b_1$ ) mayor es la variación de tensión necesaria que deben aportar los generadores, sin embargo los reactivos aportados por el SVC son menores, por lo tanto para definir un criterio de tensión se debe considerar cuál es el efecto deseado en la operación de los elementos controladores, en este caso si se dispone un margen de variación de tensión por parte de las barras PV se puede privilegiar el aporte de estas por sobre el del SVC asignándole un peso mayor, o por el contrario si se desea privilegiar el uso del SVC se le asigna un peso menor.

#### 5.2.4. Flujos de potencia.

Para corroborar la validez del modelo planteado es necesario evaluar los resultados que este arroja implementándolo en simulaciones de flujo de potencia, es decir en el modelo del SIC configurar los generadores eólicos de acuerdo a los escenarios de absorción de reactivos, configurar los generadores de las barra PV y PQ controladoras de acuerdo a los resultados de las optimizaciones, luego "correr" el flujo y observar si la tensión en la barra de generación eólica es la deseada.

Para una combinación de pesos de  $a_1 = 10, a_2 = 10, b_1 = 440$  se aplica al sistema un perfil de variación de reactivos en la barra Cardones12 y se observa como varían las tensiones en las barras controladoras.

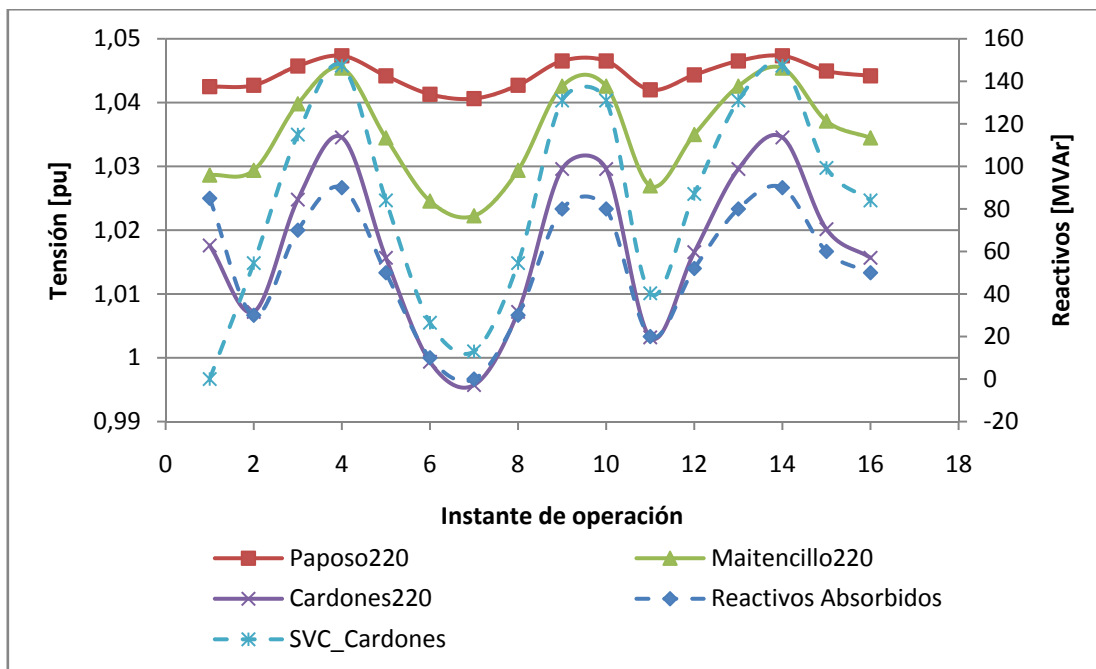


Ilustración 5-7 "Perfil de tensiones barras controladoras Cardones"

En la figura anterior se observa cómo opera el sistema ante un escenario de reactivos variable, se aprecia claramente que las tensiones en las barras controladoras PV son directamente proporcionales al nivel de reactivos absorbidos por la barra de generación eólica, por otro lado la tensión en la barra Cardones220 (barra controladora PQ) también "sigue" a la absorción de reactivos, los reactivos aportados por el SVC son en magnitud mayor a la cantidad absorbida por la barra controlada, esto se debe principalmente a que la zona de operación es "débil" en cuanto a reserva de reactivos, ya que presentaba un nivel bajo de tensiones previo a la instalaciones de unidades eólicas.

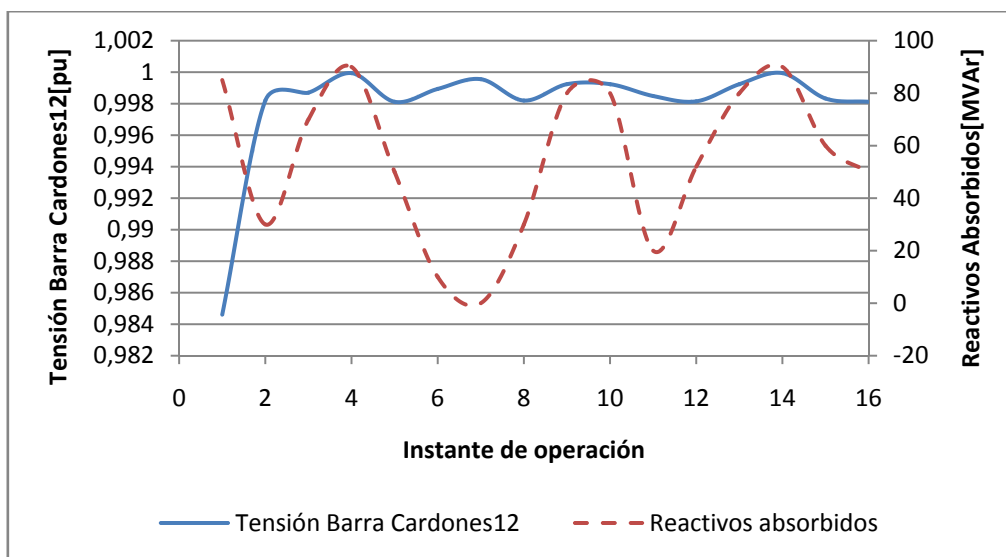


Ilustración 5-8 "tensión en barra controlada Cardones"

Al implementar los flujos de potencia con los datos obtenidos en las optimizaciones se obtienen resultados para la tensión en la barra eólica cuyo error con respecto al valor nominal no supera el

$e = 0,18\%$ , estos resultados se aprecian en la figura anterior donde se grafica el efecto en la tensión de la barra eólica producto de la regulación de tensión implementada. Al comparar las variaciones de los reactivos absorbidos en la barra eólica con respecto a la tensión lograda producto de la regulación se puede concluir que gracias al control de tensión aportado por los generadores y el SVC el voltaje de la barra de generación eólica (Cardones12) se independiza del nivel de reactivos absorbidos, operando así en una banda muy cercana al valor nominal.

### 5.3.Quillota220

La zona del caso de estudio de Quillota se caracteriza por la presencia de cuatro barras controladoras PV con la capacidad de aportar en la regulación de tensión de la barra de generación eólica Quillota12.

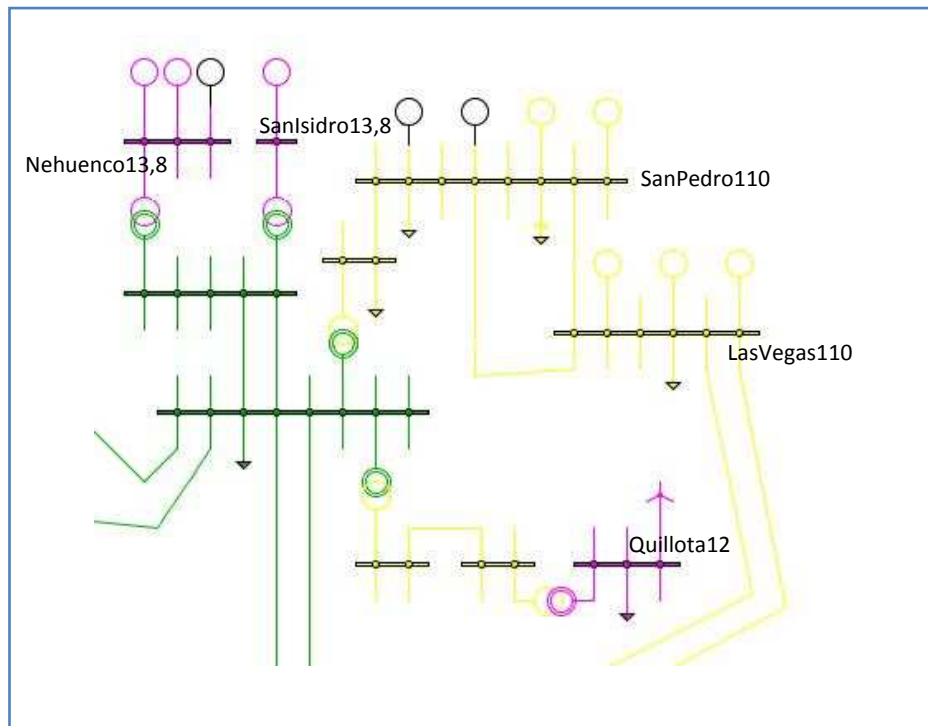


Ilustración 5-9 "Sub-sistema Quillota 220"

El estado inicial de esta zona en el modelo del SIC es:

Tabla 5-7 "Características barras controladoras Quillota"

Tipo de Barra	Nombre	Tensión [pu]
PV Controladora	B_Nehuenco13,8	1
PV Controladora	B_SanIsidro13,8	1,01
PV Controladora	B_SanPedro110	1,0025

Para esta configuración la tensión obtenida en la barra de generación eólica es:

Tabla 5-8 "Datos barra controlada Quillota"

Tipo de Barra	Nombre	Tensión [pu]	Reactivos Absorbidos[MVAr]	Potencia Activa[MW]
PQ Controlada	Quillota12	0,977	70	100

### 5.3.1. Funciones de Influencia.

El procedimiento es el mismo que el efectuado en el caso anterior, se realizan análisis de sensibilidad variando las tensiones de las barras controladoras PV y viendo el resultado en el voltaje de la barra controlada Quillota12.

Tabla 5-9 "Datos funciones de influencia Quillota"

Porcentaje de variación de tensión	Variación de Tensión resultante en Nehuenco13,8 [kV]	Función de influencia 1: Variación de tensión Quillota12[kV]	Variación de Tensión resultante en SanIsidro13,8[kV]	Función de influencia 2: Variación de tensión Quillota12[kV]
-5%	-0,574	-0,204	-0,697	-0,133
-4%	-0,552	-0,196	-0,558	-0,106
-3%	-0,414	-0,147	-0,418	-0,08
-2%	-0,276	-0,098	-0,279	-0,053
-1%	-0,138	-0,049	-0,139	-0,026
1%	0,138	0,049	0,139	0,027
2%	0,276	0,098	0,279	0,054
3%	0,414	0,147	0,418	0,08
4%	0,552	0,196	0,558	0,107
5%	0,69	0,245	0,697	0,378
Porcentaje de variación de tensión	Variación de Tensión resultante en SanPedro110[kV]	Función de influencia 3: Variación de tensión Quillota12[kV]	Variación de Tensión resultante en LasVegas110[kV]	Función de influencia 2: Variación de tensión Quillota12[kV]
-5%	-5,513	-0,105	-5,498	-0,005
-4%	-4,411	-0,084	-4,394	-0,002
-3%	-3,308	-0,063	-3,296	-0,001
-2%	-2,205	-0,042	-2,197	0
-1%	-1,102	-0,021	-1,099	0
1%	1,103	0,021	1,099	0,001
2%	2,205	0,042	2,197	0,001
3%	2,981	0,057	3,296	0,001
4%	2,981	0,057	3,771	0,001
5%	2,981	0,057	3,793	0,001

Al analizar los resultados se pueden obtener las aproximaciones lineales que parametrizan las funciones de influencia. Para la función que representa la influencia de la barra Nehuenco13,8 sobre la tensión en la barra eólica se tiene:

$$\Delta V_{Quillota12} = f_1(\Delta V_{Nehuenco13,8}) = 0,35512913 \cdot \Delta V_{Nehuenco13,8}$$

Con una correlación de:  $r = 0,99999$

Al igual que las funciones estudiadas en el caso Cardones se obtiene una buena aproximación al asumir las dependencias de carácter lineal.

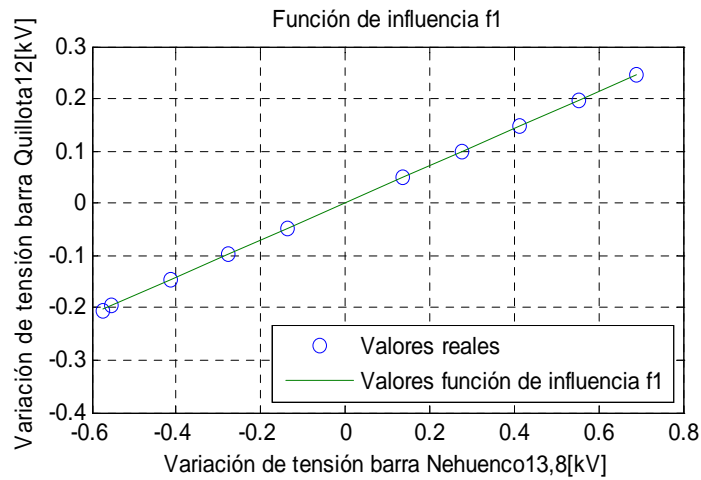


Ilustración 5-10 Función de influencia f1 Quillota"

Para la influencia de SanIsidro13,8 se tiene:

$$\Delta V_{Quillota12} = f_2(\Delta V_{SanIsidro13,8}) = 0,191191544 \cdot \Delta V_{SanIsidro13,8}$$

Con una correlación de:  $r = 0,99999$

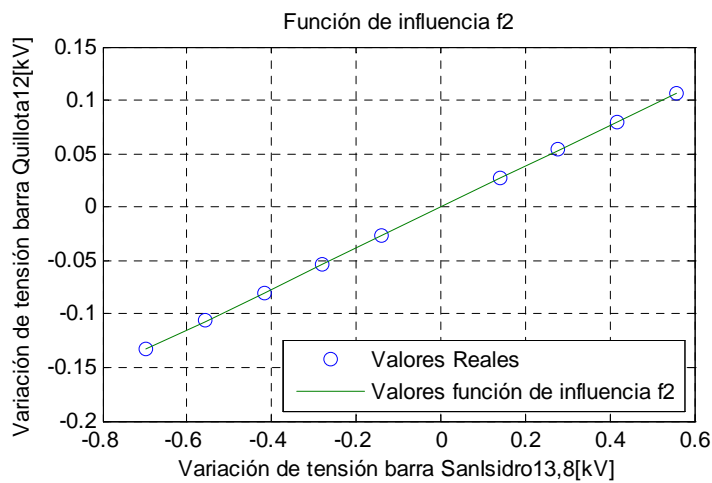


Ilustración 5-11 "Función de influencia f2 Quillota"

Para SanPedro110:

$$\Delta V_{Quillota12} = f_1(\Delta V_{SanPedro110}) = 0,0190689 \cdot \Delta V_{SanPedro110}$$

Con una correlación de:  $r = 0,9999998$

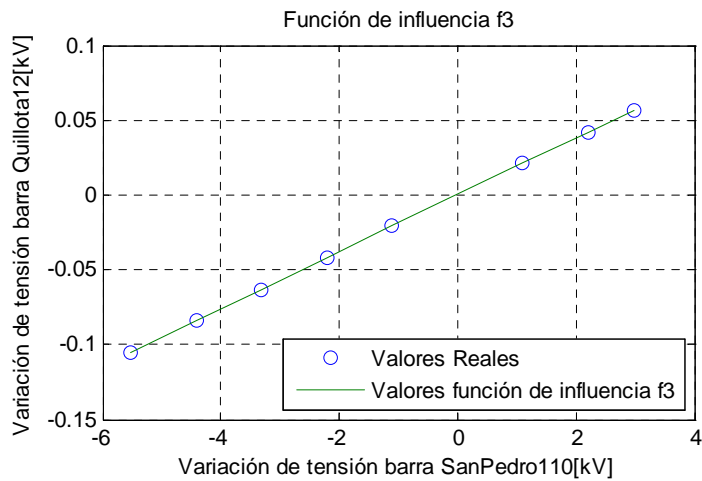


Ilustración 5-12 "Función de influencia f3 Quillota"

Para LasVegas110

$$\Delta V_{Quillota12} = f_1(\Delta V_{LasVegas110}) = 0,00047606 \cdot \Delta V_{LasVegas110} - 0,00018917$$

Con una correlación de:  $r = 0,8698$

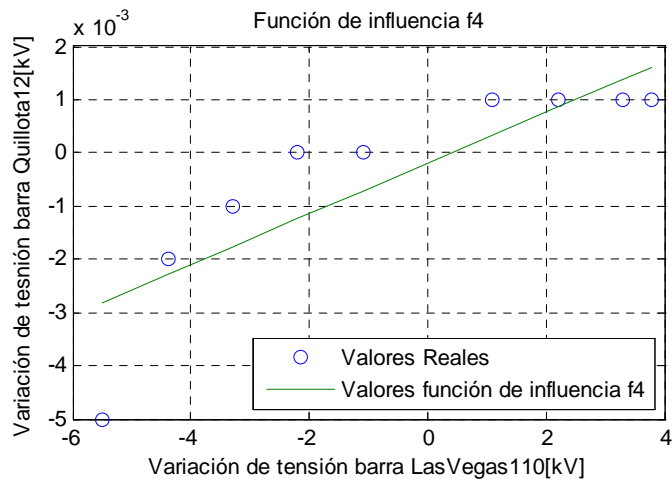


Ilustración 5-13 "Función de influencia f4 Quillota"

Al analizar las pendientes de estas aproximaciones lineales se puede establecer cuales barras controladoras son las que tienen un mayor "poder" de control, en este caso la barra Nehuenco13,8 es la que ofrece una mayor influencia seguida por la barra SanIsidro13,8, el efecto de la barra SanPedro110 es considerablemente menor pero su influencia aún resulta significativa, por último la Barra LasVegas110 presenta la menor influencia y también su aproximación lineal es la que tiene una correlación más baja, el efecto de esta barra probablemente es despreciable.



### 5.3.2. Restricciones.

Las restricciones de rangos de operación de la optimización en este caso sólo corresponden a límites de variación de tensión, cabe destacar que estos rangos se establecieron considerando como consignas de voltaje máximas y mínimas, 1,05[pu] y 0,95[pu] respectivamente [5].

Tabla 5-10 "Restricciones Quillota"

Barra	Tensión inicial [pu]	$\Delta V$ min [kV]	$\Delta V$ max [kV]
PV Nahuenco13,8	1	-0,69	0,69
PV SanIsidro13,8	1,01	-0,828	0,552
PV SanPedro110	1,0025	-5,775	5,225
PV LasVegas110	0,9987	-5,357	5,643

El perfil de tensiones en la barra eólica producto de distintos niveles de reactivos absorbidos para este sistema es el siguiente.

Tabla 5-11 "Tensiones en función de reactivos absorbidos Quillota"

Reactivos [MVar]	Tensión Quillota12[kV]	$\Delta$ Tensión Quillota12[kV]
0	12,142	-0,142
7	12,102	-0,102
14	12,061	-0,061
21	12,02	-0,02
28	11,979	0,021
35	11,937	0,063
42	11,895	0,105
49	11,853	0,147
56	11,81	0,19
63	11,768	0,232
70	11,724	0,276
77	11,681	0,319
84	11,637	0,363
91	11,593	0,407
98	11,548	0,452
105	11,503	0,497

Tabla N<sup>o</sup>1.11 "Tensión en función de reactivos absorbidos"

Al linealizar la variación de tensión en la barra eólica en función de los reactivos absorbidos se obtiene la siguiente expresión.

$$\Delta V(\Delta Q) = -0,147691 + 0,006083 \cdot \Delta Q$$

Con una correlación:  $r = 0,999879$

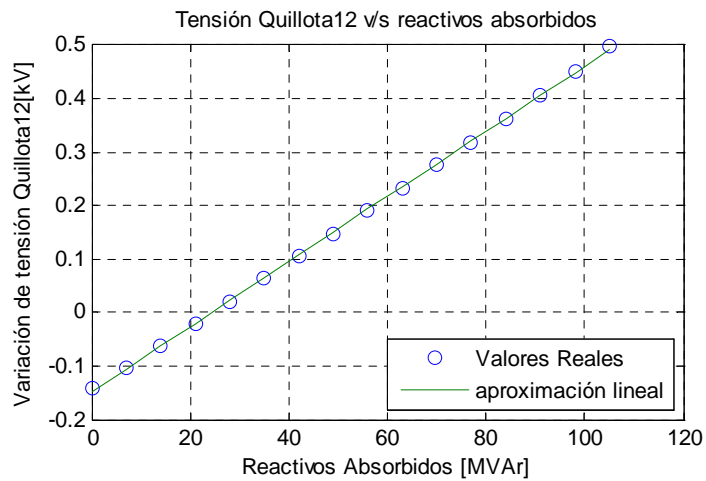


Ilustración 5-14 "Tensión en función de reactivos absorbidos Quillota"

### 5.3.3. Sistema optimización.

Con los resultados anteriores es posible plantear el sistema de minimización.

$$\min(f_o) = \Delta V_{Nehuenco13,8}^2 \cdot \alpha_1 + \Delta V_{SanIsidro13,8}^2 \cdot \alpha_2 + \Delta V_{SanPedro110}^2 \cdot \alpha_3 + \Delta V_{LasVegas110}^2 \cdot \alpha_4$$

s. a.

$$\Delta V(Q) = f_1(\Delta V_{Nehuenco13,8}) + f_2(\Delta V_{SanIsidro13,8}) + f_3(\Delta V_{SanPedro110}) + f_4(\Delta V_{LasVegas110})$$

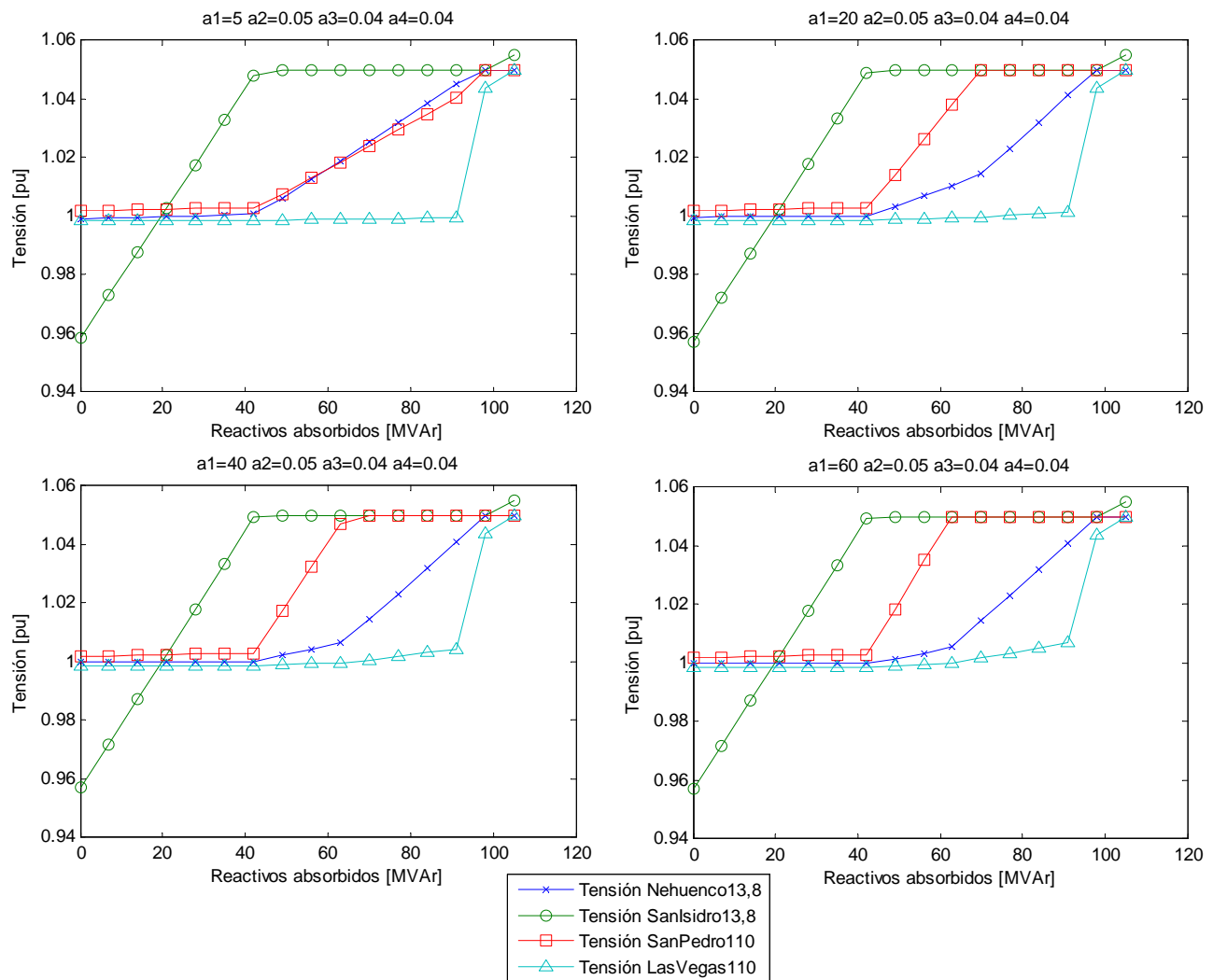
$$-0,69 \leq \Delta V_{Nehuenco13,8} \leq 0,69$$

$$-0,828 \leq \Delta V_{SanIsidro13,8} \leq 0,552$$

$$-5,775 \leq \Delta V_{SanPedro110} \leq 5,225$$

$$-5,357 \leq \Delta V_{LasVegas110} \leq 5,643$$

Al igual que el caso de Cardones, se implementaron doce simulaciones donde los pesos son:  $a_1 = 5 \cdot k$ ;  $a_2 = 0,05$ ;  $a_3 = 0,04$ ;  $a_4 = 0,04$ ; aquí el peso intervenido es el de la barra Nehuenco13.8 ( $a_1$ ) mientras que los pesos restantes representan a las barras SanIsidro13.8; SanPedro110 y Las Vegas 110 respectivamente, los resultados completos de estas optimizaciones se encuentran en los anexos A.3 y B.2, mientras que en la figura siguiente se muestra un resumen de los gráficos obtenidos.



**Ilustración 5-15 "perfil de tensiones para distintas combinaciones de pesos Quillota"**

Al realizar el proceso de optimización se hicieron varios ensayos para encontrar una combinación de pesos que logrará que el aporte en la regulación de tensión de las barras PV fuera los más homogéneo posible, a continuación se presentan cuatro gráficos que ilustran como las tensiones de la barra controladoras PV actúan para distintos niveles de absorción de reactivos por parte de la barra controlada.

Los gráficos de la figura anterior muestran como varía el perfil de tensiones de las barras controladoras para distintos pesos asociados a la barra Nehuenco13,8, para los cuatros casos se observa que se activan las restricciones de límite superior de variación de tensión. La combinación de pesos escogidas para las otras barras responde al requerimiento de que todas aporten en la regulación de tensión, si todas tuvieran el mismo peso solo la barra de Nehuenco regularía, ya que es la que presenta una mayor influencia sobre la barra eólica, sin embargo para todos los casos se aprecia que la barra SanIsidro es la que aporta prácticamente la mayor parte de la regulación de tensión hasta que satura su capacidad, luego comienzan las otras barras con su aporte, en todos los casos se observa que para los máximos niveles de absorción de reactivos (específicamente para 105[MVar]) se "rompen" las restricciones de voltaje indicando que el sistema de control en este caso no es suficiente para mantener la tensión de las

barras controladoras en su valor máximo de operación (1,05 [pu]), por lo tanto frente a este escenario es necesario otro tipo de regulación de voltaje que pueda actuar complementando a este sistema, por ejemplo regulación propia de la granja eólica.

#### 5.3.4. Flujos de potencia.

Al hacer los flujos de potencia para diversos niveles de absorción de reactivos por parte de la barra de generación eólica y aplicando el control de tensión por intermedio de las barras PV controladoras para una combinación de pesos de  $a_1 = 10$ ;  $a_2 = 0,05$ ;  $a_3 = 0,04$ ;  $a_4 = 0,04$  se obtiene el siguiente perfil de voltajes.

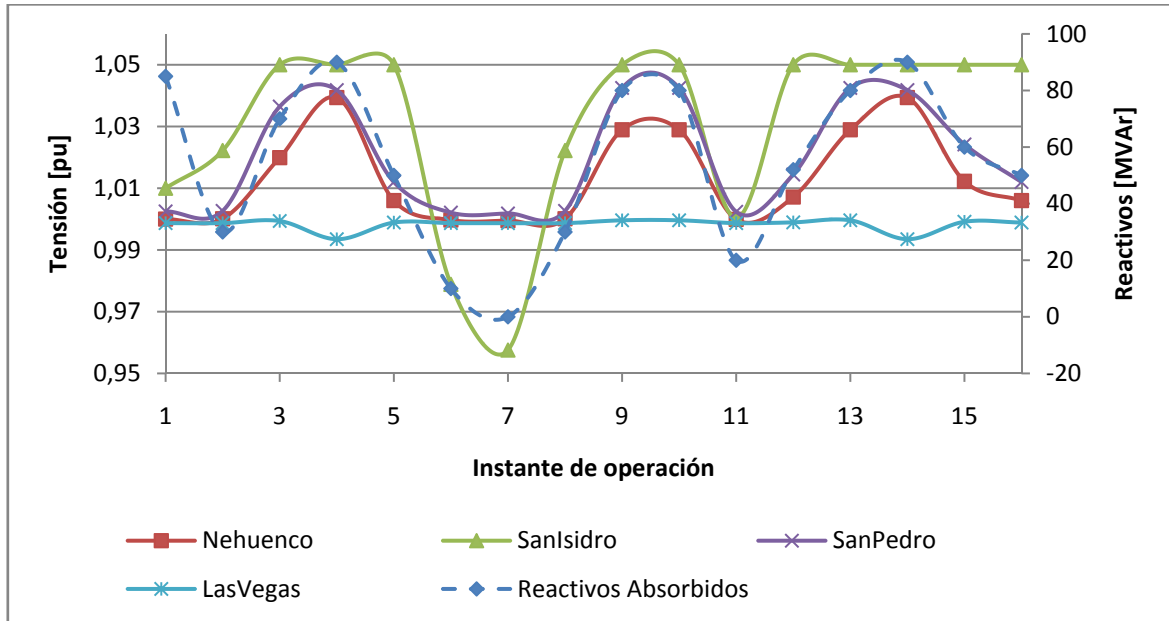


Ilustración 5-16 Perfil de tensiones barras controladoras Quillota"

En la figura se puede apreciar que el efecto de control de la barra LasVegas110 es mínimo lo cual coincide con el hecho de que su función de influencia es de menor "peso" que la de las otras barras, también se aprecia que las barras con mayor rango de acción son SanIsidro13.8 y SanPedro110, esto se debe principalmente a que el peso asociado a Nehuenco es mayor restringiendo su acción. También se observa que la tensión en SanIsidro llega a su límite superior en algunos instantes, lo cual coincide con lo observado en los gráficos de la Ilustración N°5-15.

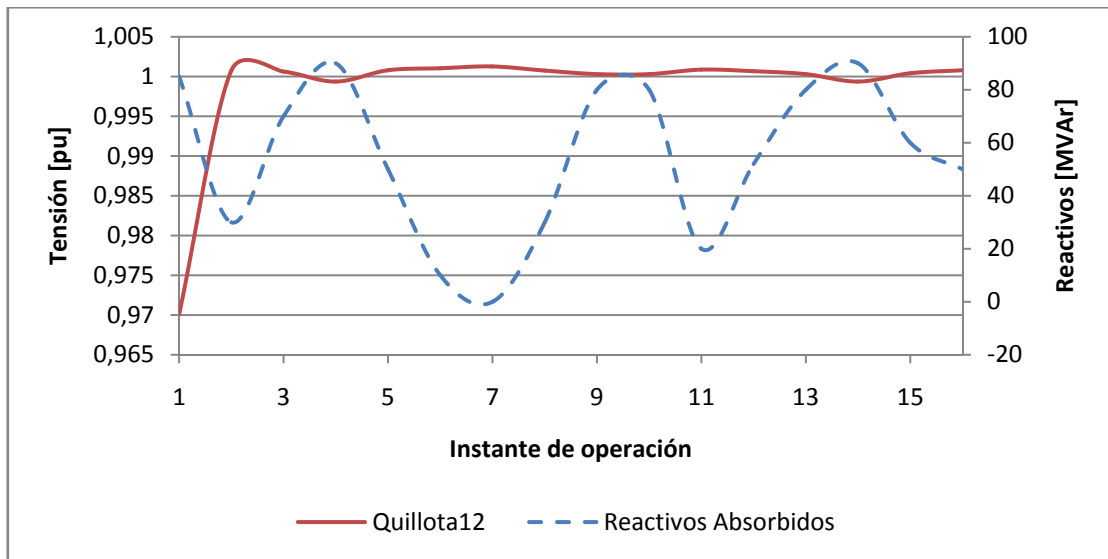


Ilustración 5-17 "Tensión en barra controlada Quillota"

Al comparar la curva de tensión en la barra controlada con respecto a la curva de reactivos, se observa que gracias al control de tensión implementado el voltaje se independiza de los reactivos manteniéndose para todos los casos en un rango muy cercano al nominal en efecto en este ejemplo el error máximo logrado es  $e = 0,12728\%$ .

#### 5.4.Valdivia220.

Para este caso se instaló un sub-sistema de generación eólica en la barra Valdivia220, esta zona se caracteriza por tener inicialmente una buena reserva de reactivos en la unidades generadoras presentes y además por tener un perfil alto de tensiones dejando así poco margen para los efectos de regulación.

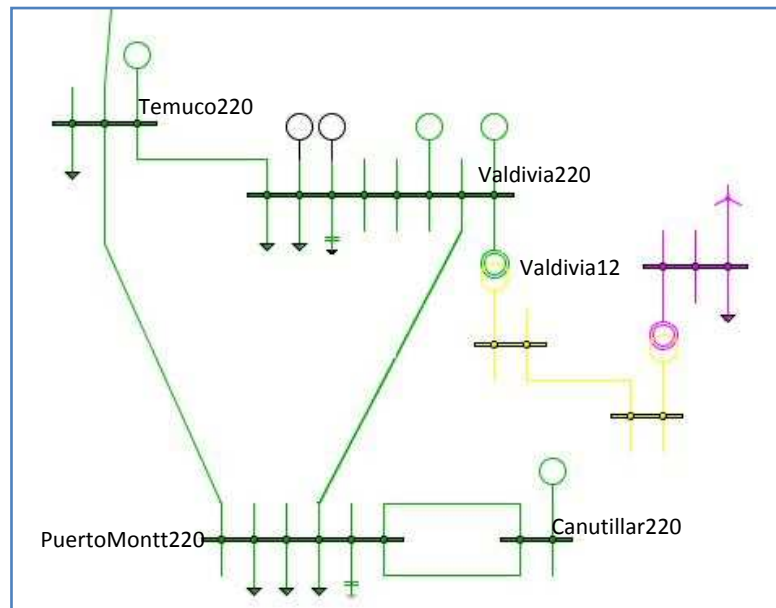


Ilustración 5-18 "Sub-sistema Valdivia220"

El estado de esta zona en el modelo del SIC es:

Tabla 5-12 "Características barras controladoras Valdivia"

Tipo de Barra	Nombre	Tensión [pu]	Reactivos[MVar]
PV Controladora	B_Canutillar220	1,043	-
PV Controladora	B_Temuco220	1,0256	-
PQ Controladora	B_Valdivia220	-	5

Para esta configuración la tensión obtenida en la barra de generación eólica es:

Tabla 5-13 "Datos barra controlada"

Tipo de Barra	Nombre	Tensión [pu]	Reactivos Absorbidos[MVar]	Potencia Activa[MW]
PQ Controlada	Valdivia12	0,9848	70	100

#### 5.4.1. Funciones de influencia.

Al realizar los análisis de sensibilidad los valores encontrados que permiten parametrizar las funciones de influencia son:

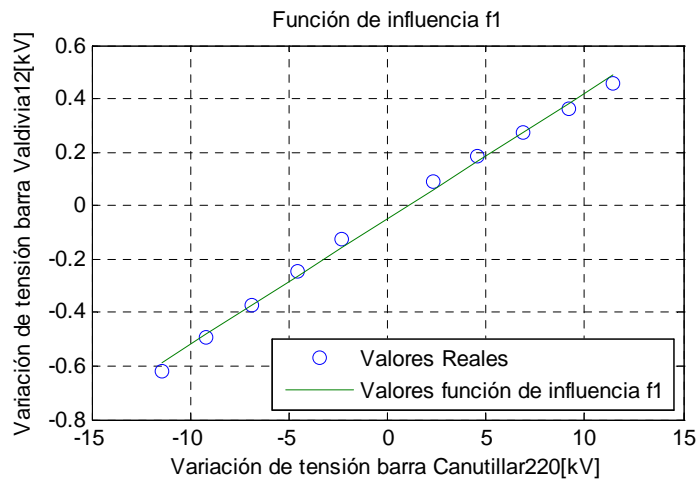
Tabla 5-14 "Datos funciones de influencia Valdivia"

Porcentaje de variación de tensión	Variación de Tensión resultante en Canutillar [kV]	Función de influencia 1: Variación de tensión Valdivia12[kV]	Variación de Tensión resultante en Temuco [kV]	Función de influencia 2: Variación de tensión Valdivia12[kV]
-5%	-11,473	-0,6208	-11,282	-0,236783
-4%	-9,1784	-0,4959	-9,0244	-0,1892975
-3%	-6,8838	-0,3714	-6,7694	-0,141914
-2%	-4,5892	-0,2472	-4,5122	-0,094541
-1%	-2,2946	-0,1234	-2,2572	-0,047268
1%	2,2946	0,09156	2,2572	0,047217
2%	4,5892	0,18295	4,5122	0,094339
3%	6,8838	0,27417	6,7694	0,141457
4%	9,1784	0,36522	9,0244	0,188482
5%	11,473	0,45612	11,2816	0,235509

Al parametrizar las funciones se obtienen:

$$\Delta V_{Valdivia12} = f_1(\Delta V_{Canutillar220}) = 0,046911784 \cdot \Delta V_{Canutillar220} - 0,0488639$$

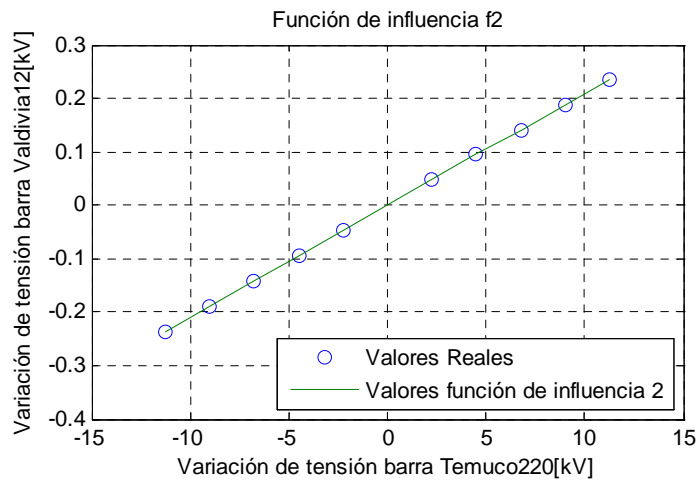
Con  $r = 0,995693588$



**Ilustración 5-19 "Función de influencia f1 Valdivia"**

$$\Delta V_{Valdivia12} = f_2(\Delta V_{Temuco220}) = 0,020931219 \cdot \Delta V_{Temuco220} - 0,0002799$$

Con  $r = 0,999998016$



**Ilustración 5-20 "Función de influencia f2 Valdivia"**

Se aprecia que la barra Canutillar220 tiene una influencia mayor sobre la tensión en la barra eólica que la barra Temuco220, esto responde principalmente a la “distancia eléctrica” entre las barras controladoras y la barra controlada.

Para la influencia de la barra Valdivia220 el análisis hecho fue con respecto a los reactivos que las unidades de generación conectadas a esa barra pueden aportar.

**Tabla 5-15 "Datos función de influencia h1 Valdivia"**

Variación Reactivos Valdivia220 [MVar]	Función de influencia 1: Variación de tensión Valdivia12[kV]
5	0,0245
10	0,0485
15	0,0723
20	0,0961

25	0,1197
30	0,1433
35	0,1667
40	0,1901

Al parametrizar resulta:

$$h_1(\Delta Q_{Valdivia220}) = 0,0047 \cdot \Delta Q_{Valdivia220} + 0,0018$$

Con  $r = 0,99996701$

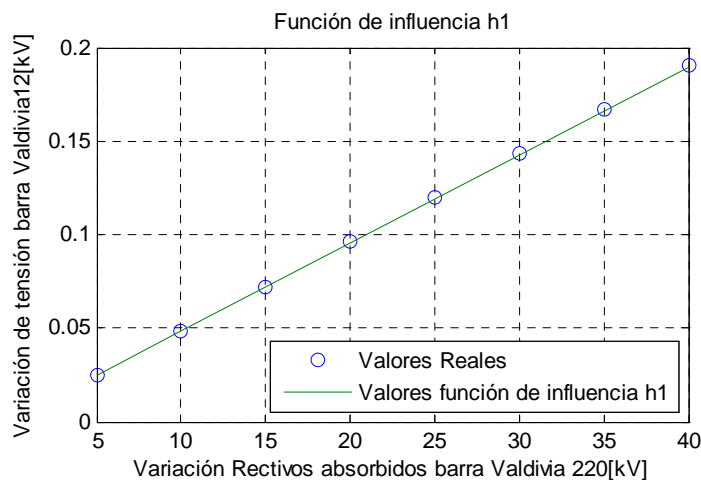


Ilustración 5-21 "Función de influencia h1 Valdivia"

#### 5.4.2. Restricciones.

Las restricciones de la optimización en este caso tienen relación con la variación de tensión de las barras PV y la capacidad de aportar reactivos de la barra PQ.

Tabla 5-16 "Restricciones Valdivia"

Barra	Tensión inicial [pu]	$\Delta V$ min [kV]	$\Delta V$ max [kV]
PV Canutillar220	1,043	-20,46	1,54
PV Temuco220	1,0256	-16,632	5,368
	Reactivos inicial [MVar]	$\Delta Q$ min [MVar]	$\Delta Q$ max [MVar]
PQ Valdivia220	0	-55	45

Por último el perfil de tensión en la barra Valdivia12 producto de los reactivos absorbidos por la generación eólica es:

Tabla 5-17 "Tensiones en función de reactivos absorbidos Valdivia"

Reactivos [MVar]	Tensión Cardones12[kV]	$\Delta$ Tensión Cardones12[kV]
0	12,509807	-0,509806630
7	12,444177	-0,444176670
14	12,377819	-0,377819060
21	12,310708	-0,310708050
28	12,24282	-0,242819790



35	12,174125	-0,174124720
42	12,104595	-0,104595184
49	12,034199	-0,034198760
56	11,962905	0,037095070
63	11,890677	0,109322550
70	11,817478	0,182521820
77	11,733167	0,266833300
84	11,647402	0,352598200
91	11,560174	0,439826000
98	11,471406	0,528594000
105	11,381013	0,618987100

La parametrización de estos valores arroja.

$$\Delta V(\Delta Q) = -0,01063143 \cdot \Delta Q - 0,53705473$$

Con una correlación:  $r = 0,99688$

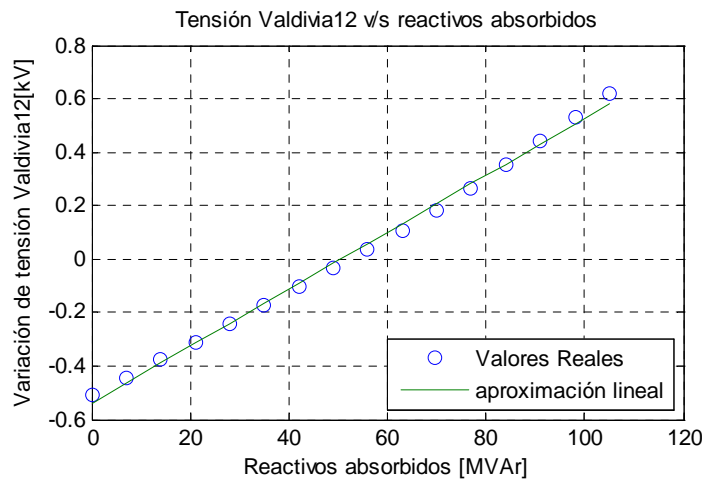


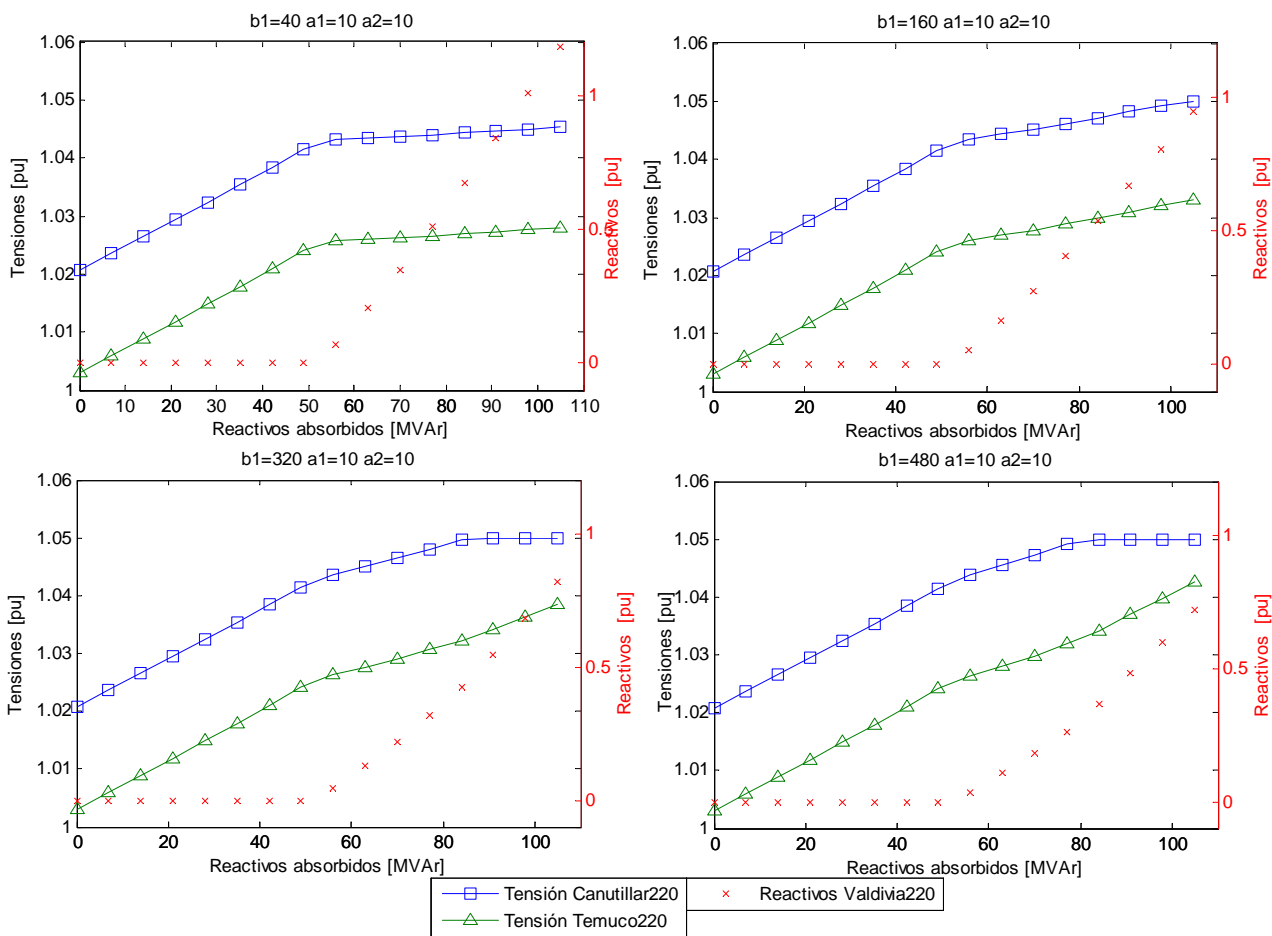
Ilustración 5-22 "Tensión en función de reactivos absorbidos Valdivia"

### 5.4.3. Sistema optimización.

Con los resultados anteriores es posible plantear el sistema de minimización.

$$\begin{aligned} \min(f_o) &= \Delta V_{Canutillar220}^2 \cdot \alpha_1 + \Delta V_{Temuco220}^2 \cdot \alpha_2 + \Delta Q_{Valdivia220}^2 \cdot \beta_1 \\ s. a. \\ \Delta V(Q) &= f_1(\Delta V_{Canutillar220}) + f_2(\Delta V_{Temuco220}) + h_1(\Delta Q_{Valdivia220}) \\ -20,46 &\leq \Delta V_{Canutillar} \leq 1,54 \\ -16,632 &\leq \Delta V_{Temuco} \leq 5,368 \\ -55 &\leq \Delta Q_{Valdivia} \leq 45 \end{aligned}$$

Al realizar las optimizaciones para distintas combinaciones de pesos (dejando fijo los pesos de las barras Canutillar220 y Temuco220 y variando de forma creciente el peso de la barra Valdivia220 que es la que tiene una mayor influencia) se obtiene:



**Ilustración 5-23 "perfil de tensiones para distintas combinaciones de pesos Valdivia"**

En los gráficos anteriores se observan las variaciones producto de las distintas combinaciones de pesos utilizados, mientras mayor es el peso “b1” menor es el aporte de reactivos necesarios por parte de las unidades de la barra Valdivia220 por otro lado las tensiones de las barras PV aumentan su aporte mientras mayor es este peso, saturándose en algunos casos la tensión en la barra Canutillar220. En este caso el aporte de reactivos de la barra PQ es realizado por una central generadora y no por un SVC, por lo que su disponibilidad para el aporte es menor, es decir no se puede forzar a una central a operar solamente aportando reactivos, ya que su principal función es el aporte de potencia activa, por lo tanto en casos como este es recomendable asignarles un peso mayor a la barra PQ privilegiando así mantener su reserva de reactivos. Los resultados de todos los casos implementados en la optimización se encuentran en los anexos A.2 y B.3.

#### 5.4.4. Flujos de potencia.

Al aplicar un perfil de variación de reactivos absorbidos a este sistema para un configuración de pesos de  $b1 = 480$ ;  $a1 = 10$ ;  $a2 = 10$  se obtienen las variaciones de tensiones necesarias para mantener la tensión en la barra eólica a nivel nominal, se observa que las tensiones sufren variaciones proporcionales al nivel de reactivos absorbidos. Para esta zona en particular las tensiones obtenidas están todas sobre el nivel nominal de operación esto se debe a que inicialmente el sistema se encontraba configurado a

niveles altos de tensión, por otro lado los reactivos absorbidos por la unidades de generación de la barra PQ son los que realizan mayoritariamente el trabajo de regulación, ya que operan absorbiendo e inyectando reactivos según sea necesario, esto también es lo que ayuda a que las tensiones en las barra reguladoras PV no varíen tanto sus consignas de tensión puesto que si la barra PQ no fuera capaz de absorber reactivos las barras PV tendrían que disminuir considerablemente sus consignas de tensión

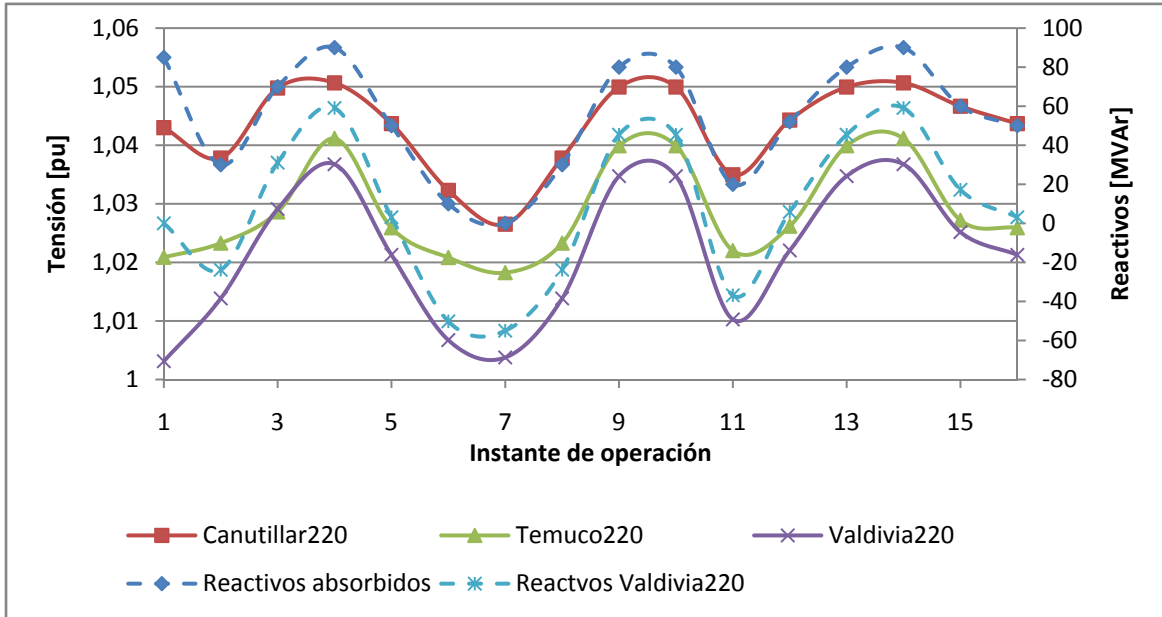


Ilustración 5-24 "perfil de tensiones barra controladoras Valdivia"

En este caso se aprecia que para los niveles más altos de absorción de reactivos la tensión en la barra Canutillar220 se satura llegando al nivel máximo de tensión posible (1,05[pu]), lo cual es consecuente con los gráficos de la Ilustración5-23.

Al realizar los flujos de potencia considerando las configuraciones de tensiones y de reactivos para las barras PV y PQ de acuerdo a los resultados de la optimización se obtiene en la barra eólica el siguiente perfil de tensión

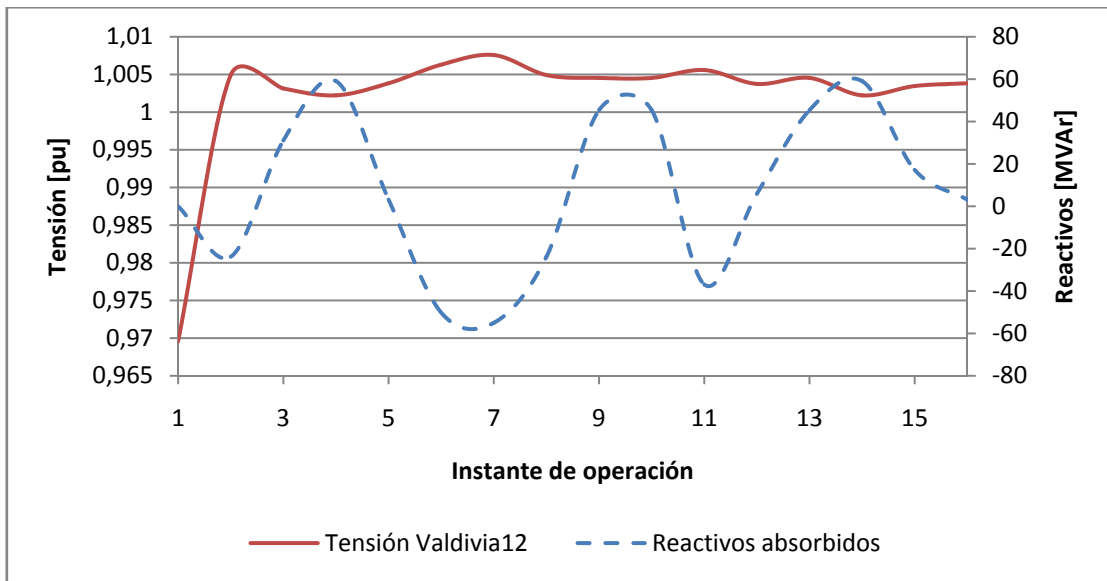


Ilustración 5-25 "Tensión en barra controlada Valdivia"

La variación de tensión obtenida para los distintos niveles de absorción de reactivos indica la validez del control de tensión implementado, obteniéndose una independencia del voltaje de la barra con respecto a la potencia reactiva absorbida, la tensión para esta simulación llega a un error máximo de  $e = 0,757675\%$  con respecto al valor nominal.

# Capítulo 6

## Implementación y alcances del sistema de control.

Para poder implementar un sistema de control como el propuesto es necesaria una infraestructura capaz de realizar las acciones planteadas de manera eficaz, para esto se requiere que las unidades de generación de cada barra controladora tengan configurados sus respectivos esquemas de control. La principal característica del modelo planteado es que para manejar la tensión de una barra (generación eólica) se disponen de múltiples unidades que aportan en la regulación de voltaje, es decir es un control multivariable de voltaje.

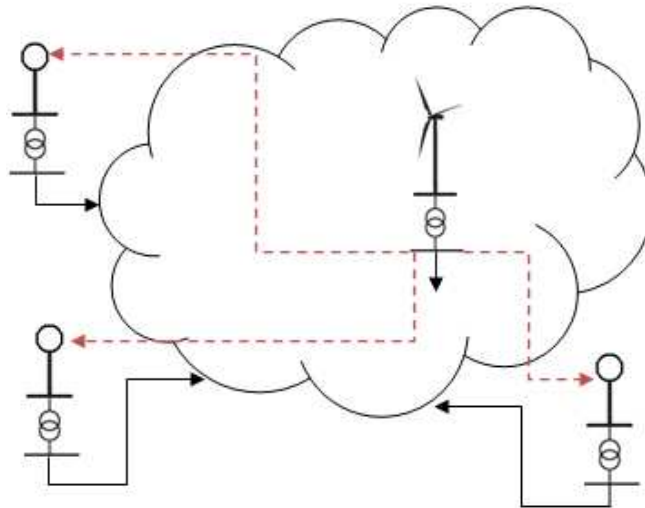


Ilustración 6-1 "Esquema sistema de control"

Dada las características topológicas de la red, las unidades controladoras por lo general se ubicarán a varios kilómetros de la barra controlada y como se necesita que el sistema de control actúe con cierta rapidez es necesaria una plataforma de comunicación eficaz que posibilite la transmisión de información.

El planteamiento teórico descrito en el Capítulo 4 es válido para instantes de operación en que las características del sistema se mantienen constantes, es decir los consumos y la generación no varían considerablemente, por lo tanto el esquema de control debe ser capaz de darse cuenta si el sistema cambió sus características para así re-calcular los parámetros de la optimización, estos cambios se pueden deber a variaciones en la curva de demanda, disponibilidad de las centrales convencionales de generación, re-despacho, etc.

## 6.1.Control-Monitoreo.

Los alcances del sistema de control propuesto se ven restringidos por los cambios propios que afectan al sistema eléctrico, ya que las funciones de influencia que definen las dependencias de control se ven afectadas por estos cambios, por otro lado frente a distintos escenarios en el sistema eléctrico el criterio de regulación de tensión puede cambiar, puesto que el uso de las unidades generadoras no es exclusivo del sistema de control. Por lo tanto es necesario definir una secuencia de control-monitoreo que permita actualizar las funciones de influencia y actualizar el criterio de control de tensión mediante las modificación de los pesos asociados a cada barra controladora.

La interacción que debe existir entre los estados de monitoreo y de control está dado por un rango de acción predefinido, este rango se establece definiendo los tiempos en los que actúan cada estado, por lo tanto durante una ventana de tiempo va actuar el sistema de control de tensión ya configurado, cuando termine esta ventana de tiempo comienza el estado de monitoreo donde se establecen las nuevas funciones de influencias y los pesos de las barras de control para dar paso así a un nuevo estado de control.

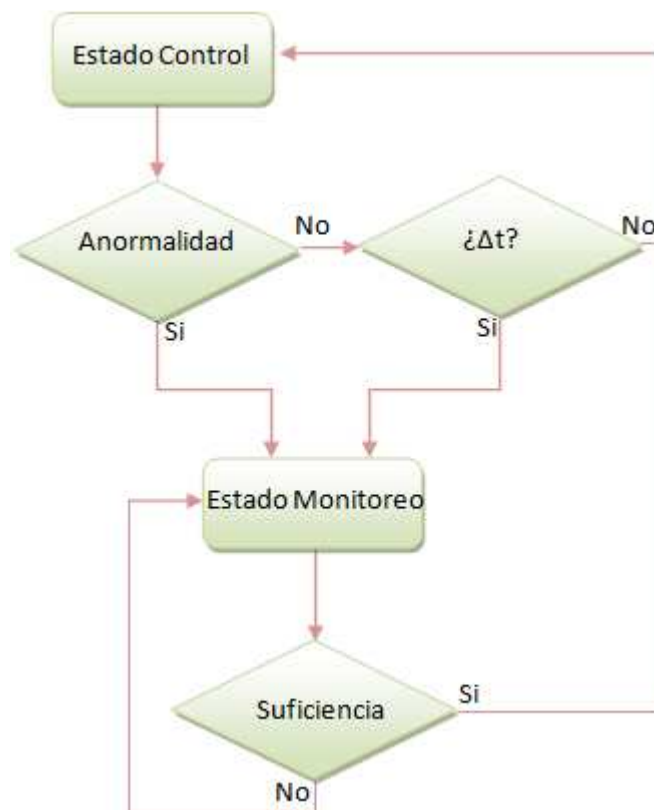


Ilustración 6-2 "Diagrama de flujo"

En el diagrama de la figura anterior se presenta un esquema tentativo de cómo debiera ser la interacción de los estados de control de tensión y el estado de monitoreo del sistema donde:

- **Estado de Control:** es el estado en el que opera el sistema de control de voltaje, con funciones de influencias y pesos del criterio de tensión definidos previamente en un estado de monitoreo, en este estado el sub-sistema eléctrico realiza los cambios en las barras controladoras PV y PQ para poder controlar la tensión en la barra eólica producto de la absorción de reactivos de los aerogeneradores.
- **Anormalidad:** este bloque representa el hecho de posibles anomalías y contingencias en el sistema eléctrico, estas contingencias obligan a realizar un nuevo monitoreo y establecer nuevas funciones de influencias. Posibles contingencias que hagan requerir un nuevo monitoreo del sistema son: centrales fuera de servicios; fallas en el sistema de transmisión; contingencias en las unidades eólicas; etc.
- **$\Delta t$ :** este bloque representa el tiempo de operación válido para el estado de control, es decir cada estado de control tiene un tiempo limitado de acción, luego de este lapso de tiempo es necesario una actualización en las funciones de influencia y en el criterio de regulación de tensión.
- **Estado de Monitoreo:** este estado es en el cual se establecen las funciones de influencia y se define el criterio de control de tensión a usar de acuerdo a las características del sistema, su duración debe ser breve para dar paso así al estado de control, sin embargo si no se cumplen las condiciones para un correcto sistema de control, se debe mantener el monitoreo hasta encontrar una configuración válida para la regulación de tensión.
- **Suficiencia:** este bloque representa la verificación de la implementación del sistema de control, si no se puede implementar un sistema de control válido se prolonga el estado de monitoreo, hasta cuando sea posible configurar un nuevo estado de control.

## 6.2. Anormalidades y Excepciones.

Dentro de las contingencias que hagan requerir al sistema de optimización una nueva configuración de sus parámetros de manera inmediata saltándose el rango de tiempo establecido para el estado de control están [3][22]:

- **Disponibilidad de unidades generadoras.** Problemas en la generación de las unidades pertenecientes al sub-sistema eléctrico (barras controladoras PV y PQ) producen una disminución en la capacidad de regulación de tensión, esta disminución puede ser crítica dependiendo del tamaño de la unidad de generación afectada.
- **Problemas en el sistema de transmisión.** Este tipo de anomalías afectan directamente las funciones de influencia de la optimización en efecto si el sub-sistema eléctrico en el cual se

aplica el criterio de regulación de tensión tiene unidades de generación conectadas “radialmente” un problema en la transmisión puede ser crítico.

- **Contingencias en la barra eólica:** Frente a cualquier inconveniente en el parque eólico donde se regula tensión, el sistema de optimización debe entrar en estado de monitoreo, ya que eventualmente frente a este tipo de problemas no es necesario aplicar la regulación de tensión, por ejemplo si en el parque eólico salen de servicio muchas unidades, el efecto sobre la barra eólica producto de la absorción de reactivos de las unidades restantes puede que sea mínimo, por lo tanto no es necesario utilizar los recursos del sistema eléctrico en acciones innecesarias.

Dentro de los cambios en el sistema que no representan contingencias que interrumpen el estado de control, si no que son cambios analizados en el estado de monitoreo una vez terminado el periodo de acción del último estado de control están:

- **Re-despacho en el sistema eléctrico.** Cambios en los niveles de despacho en las unidades de generación (barras controladoras PV y PQ) restringen el uso de los reactivos de estas, lo cual limita los márgenes de regulación de tensión que cada una de estas unidades puede efectuar, en términos de la optimización se disminuye el rango de las restricciones de desigualdad.
- **Nivel de generación del parque eólico.** Cambios muy bruscos en el nivel de generación del parque eólico controlado puede requerir nuevos parámetros en el sistema de optimización, la diferencia de este escenario con respecto al de “Contingencias en la barra eólica” es que en este caso no salen de operación las unidades eólicas.
- **Servicios complementarios.** Eventualmente las unidades del sub-sistema eléctrico pueden estar efectuando otros servicios complementarios en la red y dependiendo de la jerarquía de estos servicios pueden restringir el uso de las unidades controladoras por parte del sistema de control de tensión disminuyendo así los intervalos de las restricciones de desigualdad del sistema de optimización.
- **Regulación interna de reactivos.** Dependiendo del parque eólico su capacidad de regulación interna de reactivos puede variar, junto con el sistema de optimización se puede establecer un plan para el uso de esta capacidad interna, por lo tanto los niveles de reactivos absorbidos por los aerogeneradores varían de acuerdo a este plan de uso de esta reserva, lo que implica un cambio en la regulación de tensión por lo tanto un cambio en el sistema de optimización.



### 6.3. Plataforma de desarrollo.

Para poder realizar todos los procedimientos descritos es necesario disponer una plataforma de procesamiento de información robusta que pueda adquirir datos y efectuar acciones de control. La principal herramienta utilizada en el monitoreo y control de los sistemas eléctricos de potencia son los sistemas SCADA (del Inglés Supervisory Control and Data Acquisition).

Los sistemas SCADA comprenden de una red de comunicaciones “distribuida” espacialmente que permite el control remoto y monitoreo de las condiciones y estados de los dispositivos que se monitorean y/o controlan, la implementación física (Hardware) de los SCADA comprenden principalmente de [11]:

- **Instrumentación y equipos de control remoto:** Corresponde a los instrumentos que miden las variables de interés a controlar y a los equipos que efectúan las acciones de control.
- **RTU y terminales ubicados en terreno:** Son los equipos que interactúan con los dispositivos de medición y control, procesan la información que estos registran y le aplican las acciones de control de acuerdo a las órdenes que reciben de los ECC. En este grupo se encuentran los PLC, DCS y IED.
- **Sistemas de Comunicaciones:** Son utilizados para transferir la información entre los dispositivos RTU y ECC, estas plataformas pueden ser implementadas por distintos tipos de medios de transmisión (señales de radio, fibra óptica, telefonía, etc.).
- **Estación de Control Central:** El ECC es la base del control y monitoreo del sistema en donde los operadores observan el funcionamiento y realizan acciones de control sobre este, puede estar compuesta por un computador o varios conectados entre sí mediante una red de área local (LAN del inglés Local Area Network).
- **Rutina de Procesamiento de datos:** El programa computacional del SCADA permite visualizar el funcionamiento de las variables controladas, además el programa computacional puede procesar la información proveniente de las RTU y realizar los respectivos procesamientos de esta información que permitan efectuar las acciones de control programadas.

Una descripción del funcionamiento de los distintos componentes de un SCADA se muestra en la Ilustración 6-3.

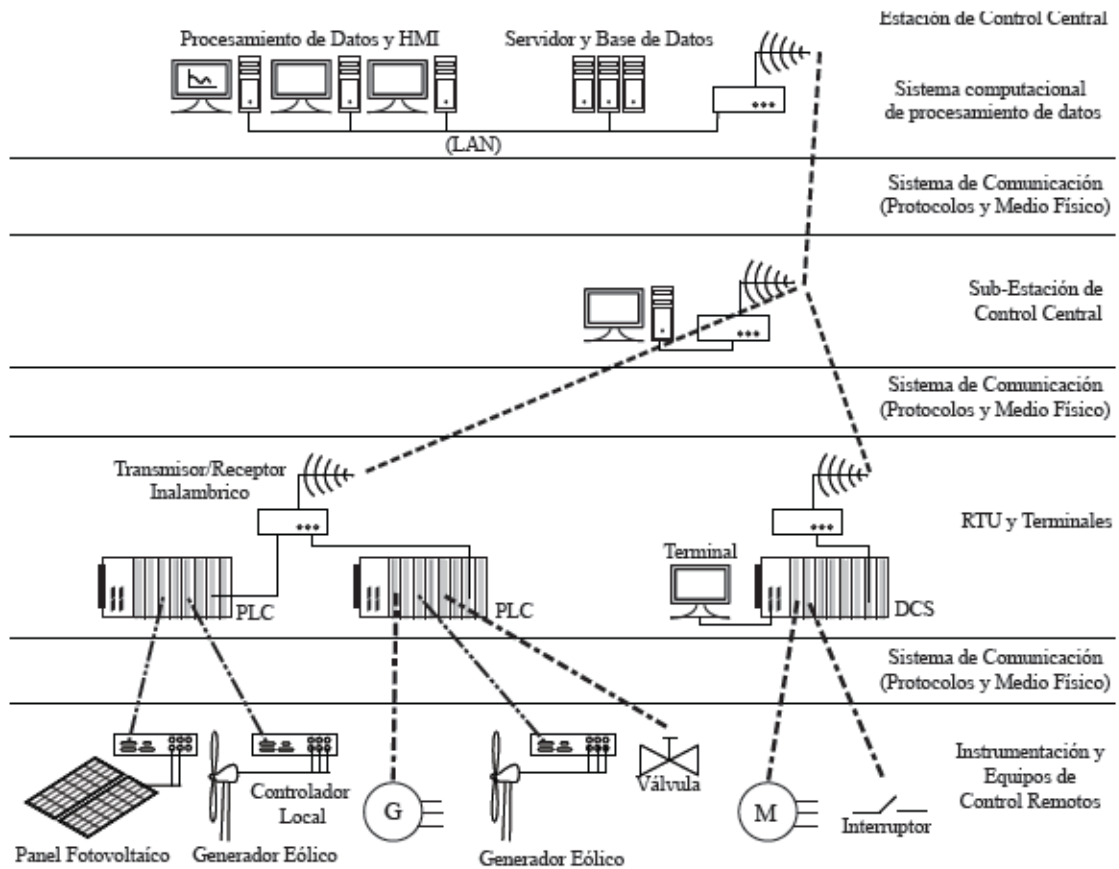


Ilustración 6-3 "Esquema SCADA"

Las características de los SCADA varían de acuerdo a los requerimientos del sistema, pero por lo general la descripción entregada anteriormente es válida para la mayoría de estas plataformas, por lo que es completamente implementable el sistema de control propuesto en este trabajo, basta con definir las variables controladas (las tensiones en las barras eólicas) y las variables controladoras (tensiones y reactivos de las barras PV y PQ respectivamente) y desarrollar una rutina computacional que realice las optimizaciones de acuerdo a un criterio de tensión (pesos en la función objetivo) establecido.

# Capítulo 7

## Análisis y Conclusiones.

### 7.1. Conclusiones.

En este trabajo se ha propuesto una forma alternativa para la regulación de tensión en redes con presencia de generación eólica, de acuerdo a los objetivos planteados se creó un método teórico aplicable a cualquier tipo de red y se implementó en un modelo simplificado del SIC analizando así la viabilidad de este tipo de regulación en el sistema eléctrico chileno.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las tres zonas estudiadas (Quillota, Cardones y Valdivia) siempre es posible utilizar la capacidad de regulación de los generadores convencionales con el fin de colaborar con la mejora del voltaje en las barras comprometidas con la inyección de energía eólica, no obstante para los escenarios de absorción de reactivos estudiados se observó que en las zonas con mayores distancias eléctricas entre generación convencional y generación eólica, para ciertos escenarios, es imposible solo con este tipo de regulación lograr que el voltaje en la barra eólica se mantenga en los valores establecidos por la norma, haciéndose necesaria la instalación de nuevos equipos para la regulación de voltaje (SVC's y/o equipos de regulación local de tensión).

Los aportes que cada generador puede realizar están restringidos no solo por los límites técnicos (voltajes mínimos, máximos y límites de aportes reactivos) sino que por la operación del sistema, es en este punto donde se hace necesario una planificación en el uso de esta regulación de tensión complementándola con los otros servicios que prestan los generadores. Con este fin se implementó en el método teórico la utilización de los “pesos” en la minimización de la función objetivo permitiendo así la asignación de prioridades en el uso de los generadores y equipos de regulación de tensión. Para los casos estudiados se observó la capacidad que tiene este sistema de pesos en la planificación de la regulación de tensión, por un lado se implementó de manera satisfactoria el establecimiento de prioridades en el control de voltaje, es decir, con los pesos se pudo configurar cuales generadores o equipos realizaban el mayor aporte dado un escenarios de absorción de reactivos, pero solo con los pesos no se pudo establecer “una configuración” que complementara el uso de esta regulación de tensión con el resto de servicios complementarios y con la operación intrínseca de la red. Para lograr esta complementariedad se planteó un diagrama de flujo tentativo en el cual se establecen “estados” en la utilización del método de control de voltaje, donde periódicamente se configuran los parámetros del sistema de optimización y se actualizan los pesos, de esta forma se ajusta el método cada cierto tiempo a los requerimientos y disponibilidad de los recursos de la red.

Al corroborar los resultados del método teórico implementando los respectivos flujos de potencia se obtuvieron en cada uno de los casos estudiados valores muy cercanos a los esperados, es decir, se pudo implementar de manera satisfactoria el método de control de tensión en un modelo computacional del

SIC. Los valores de las tensiones reguladas (barras de inyección eólica), salvo contadas excepciones, bordean el nivel nominal para cada uno de los escenarios de absorción de reactivos, por lo tanto se puede concluir que las simplificaciones e hipótesis del sistema de optimización son adecuadas y permiten la implementación del método de control de tensión en un sistema eléctrico real.

En síntesis se implementó un sistema de control de tensión que permite el uso conjunto de la capacidad de regulación de voltaje de los generadores convencionales presentes en una red, con el fin de mantener la tensión de las barras de inyección de energía eólica en rangos nominales de operación frente a cualquier escenario de absorción de reactivos por parte de los aerogeneradores conectados a estas barras, por lo tanto se concluye que es posible minimizar en una red la utilización de equipamiento de regulación de voltaje adicionales presentes en los parque eólicos, colaborando en la estabilidad del sistema eléctrico con recursos propios de la red que no incurren en inversiones económicas adicionales.

## **7.2.Trabajo Futuro.**

Dado los positivos resultados obtenidos en este trabajo se plantean a continuación distintas ideas que debieran abordarse en posibles futuros trabajos sobre este método de control de tensión.

- Estudiar de forma más específica el efecto sobre las demás barras del sistema y la posibilidad de efectuar regulación de voltaje en barras intermedias a dos sub-sistemas ya presentes en una red.
- Implementar en simulaciones dinámicas este método para ver el comportamiento del sistema frente a fenómenos transitorios.
- Establecer un procedimiento de asignación de pesos de la función objetivo con respecto a las prioridades que se le asignen a cada generador participante en la regulación de tensión
- Plantear este sistema de control como un servicio complementario por parte de los generadores convencionales, averiguar y proponer posibles mecanismos de tarificación de este servicio.

## Referencias

- [1]. Johanna Monteiro, *Modelación Dinámica de Parques Eólicos para una integración masiva en el SIC*. Trabajo de Título, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, 2008.
- [2]. Alan Mullane, Mark O'Malley, *The Inertial Response of Induction-Machine-Based Wind Turbines*. 2005.
- [3]. Walter Brokering, Rodrigo Palma, Luis Vargas, *Los Sistemas Eléctricos de Potencia*. 2008.
- [4]. Keith Watt A, *Simulación Dinámica para distintos escenarios de Alta Penetración Eólica en el SIC*. Trabajo de Título, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, 2008.
- [5]. Comisión Nacional de Energía, *Norma técnica de Seguridad y Calidad de Servicio*. 2005.
- [6]. Universidad de Chile, Universidad Santa María, *Aporte potencial de: Energías Renovables No Convencionales y Eficiencia Energética, 2008-2025*. Junio 2008.
- [7]. Comisión Nacional de Energía, *Fijación de Precios de Nudo Octubre de 2009 Sistema Interconectado Central Informe Técnico Definitivo*. Octubre 2009.
- [8]. Comisión Nacional de Energía, *Informe Generación Bruta Sistemas: SIC 1996-2009 SING 1999-2009*. Septiembre 2009.
- [9]. Tony Burton, David Sharpe, *Wind Energy Handbook*.2001.
- [10]. Thomas Ackermann, *Wind Power in Power Systems*.2005.
- [11]. Bailey D., Wright E.,*Practical SCADA for Industry*. 2005.
- [12]. CDEC-SIC, *Estadísticas Programación diaria 17 de Julio 2009*.
- [13]. CDEC-SIC, *Estadísticas Programación anual 2009*.
- [14]. CDEC-SIC, Información Técnica del SIC Empresas Generadoras, Empresas Transmisoras. 2009.
- [15]. CDEC-SIC, Crecimiento de la demanda neta anual SIC 1985-2010. Enero 2010.
- [16]. [www.e-seia.cl](http://www.e-seia.cl), *Sitio web Comisión Nacional del Medio Ambiente CONAMA*. 2010.
- [17]. [www.ewea.org](http://www.ewea.org), *Sitio web The european wind energy association EWEA*. 2010.
- [18]. [www.awea.org](http://www.awea.org), *Sitio web American wind energy association AWEA*. 2010.
- [19]. A. Tapia, G. Tapia, J.X. Ostolaza, *Reactive power control of wind farm for voltage control applications*. 2003.
- [20]. Rolf Grünbaum, *Voltage and power quality control in wind power applications by means of dynamic compensations*. 2005.
- [21]. GE Energy, *Wind Power Plant Performance*.2009.
- [22]. Allen J.Wood, *Power Generation, Operation, and Control*. 1996.
- [23]. [www.guidedtour.windpower.org](http://www.guidedtour.windpower.org), *Sitio web Danish wind industry association*. 2010.

# Anexos.

## A. Gráficos de perfil de tensiones y reactivos.

En esta sección se presentan todos los gráficos obtenidos para las distintas combinaciones de pesos realizadas con el método teórico implementado en el capítulo 4.

### A.1. Resultados Cardones.

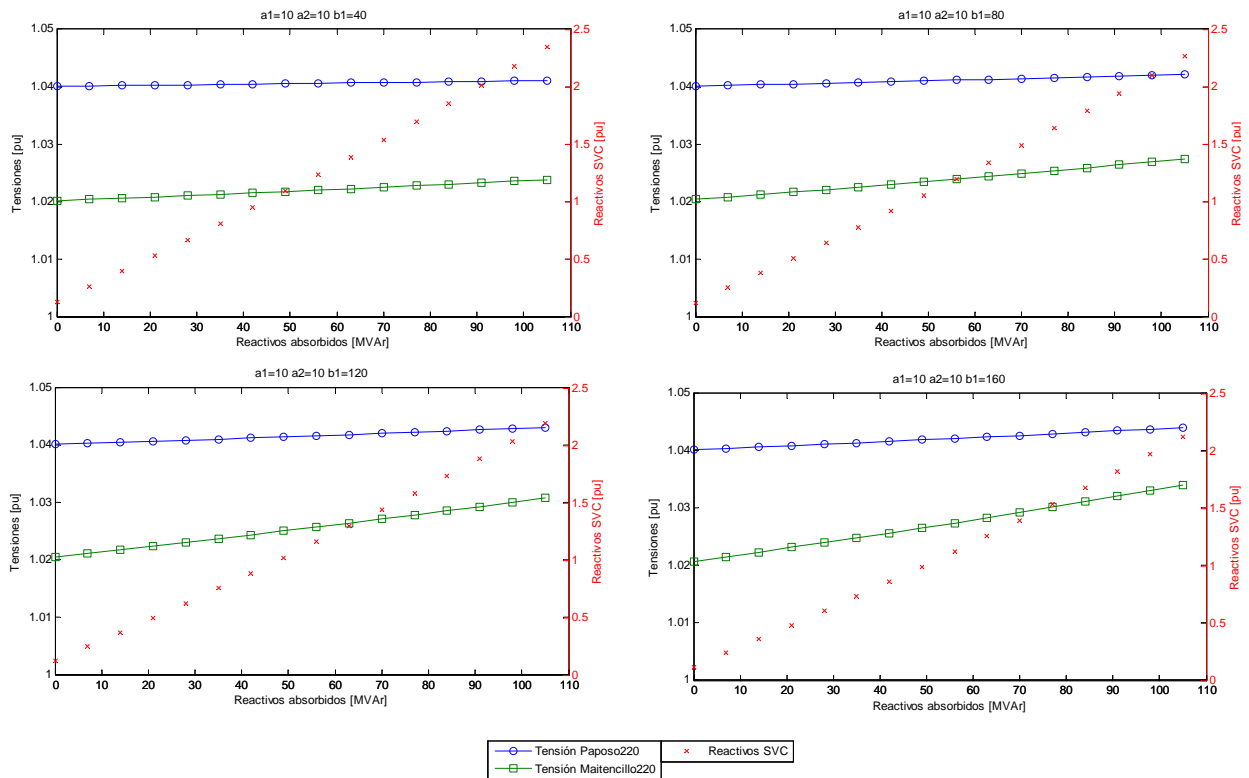


Ilustración A-1 "Cardones12\_a1=10\_a2=10\_a3=40-160"

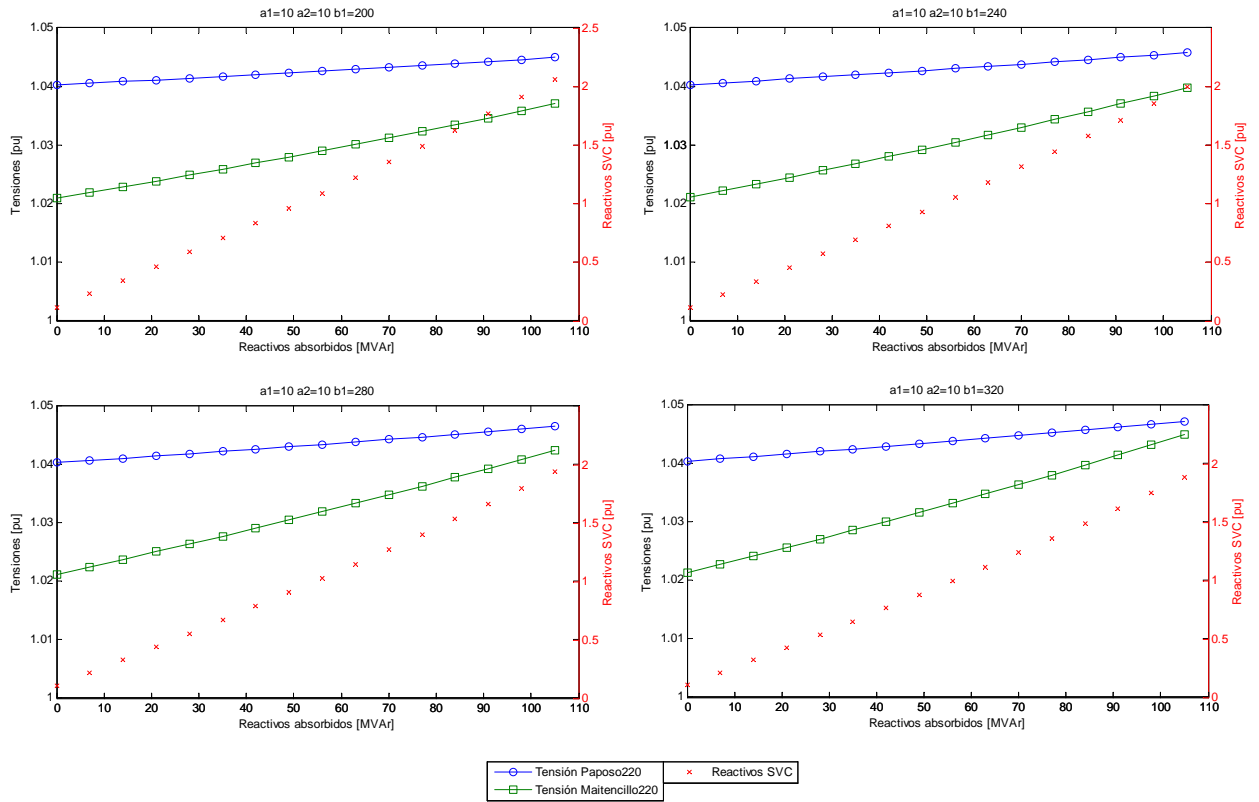


Ilustración A-2 "Cardones12\_a1=10\_a2=10\_a3=200-320"

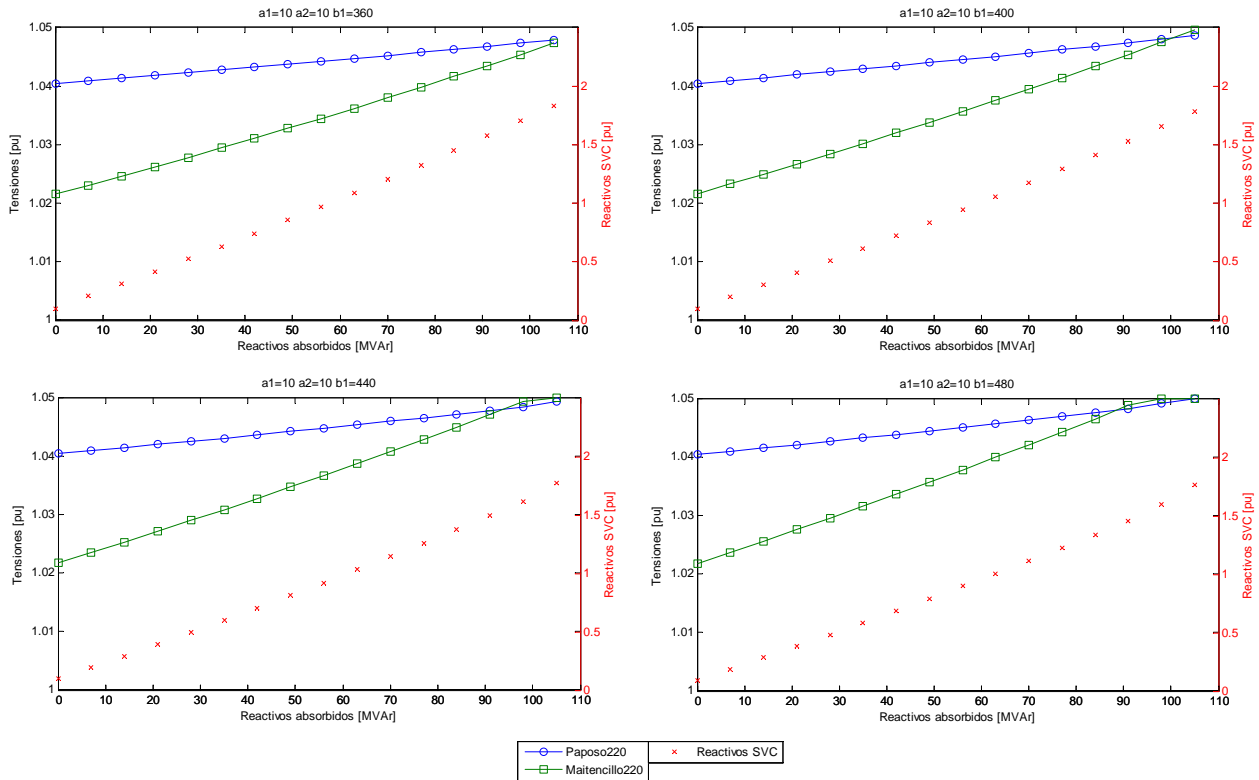


Ilustración A-3 "Cardones12\_a1=10\_a2=10\_a3=360-480"

## A.2. Resultados Valdivia.

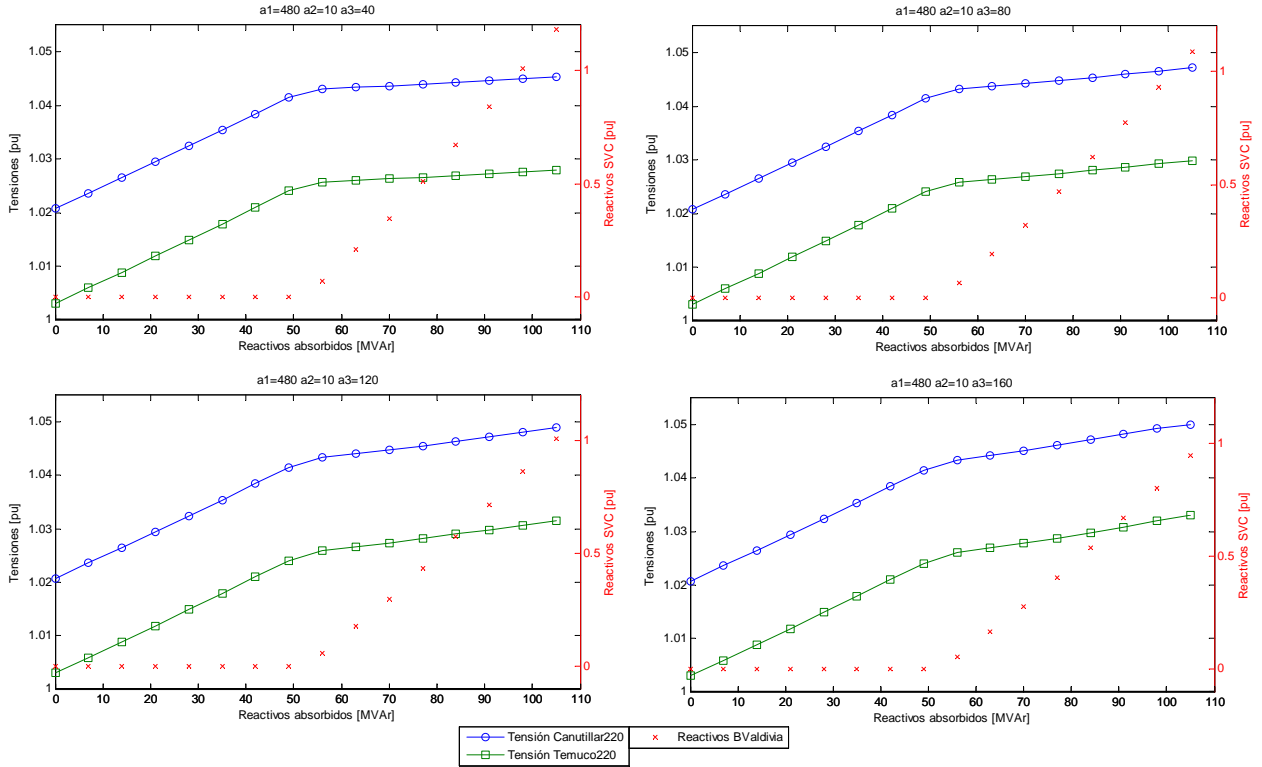


Ilustración A-4 "Valdivia12\_a1=40-160\_a2=10\_a3=10"

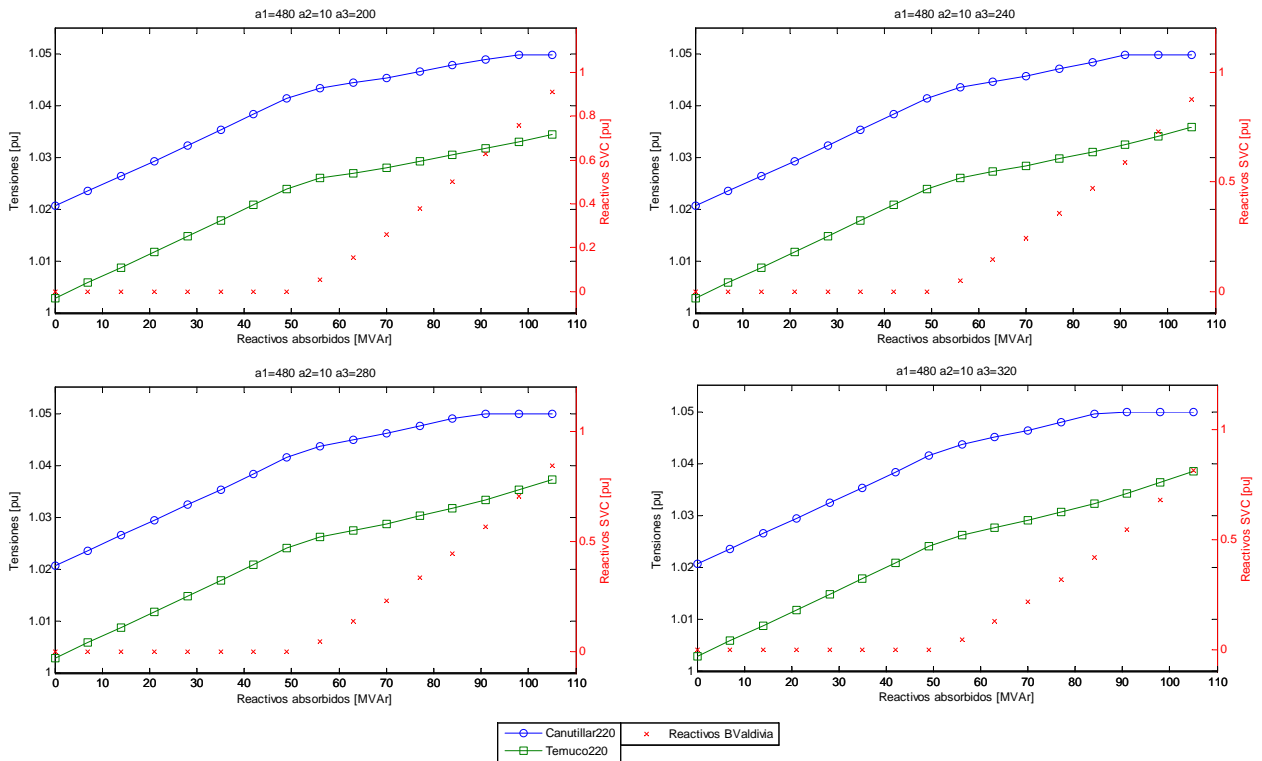


Ilustración A-5 "Valdivia12\_a1=200-320\_a2=10\_a3=10"



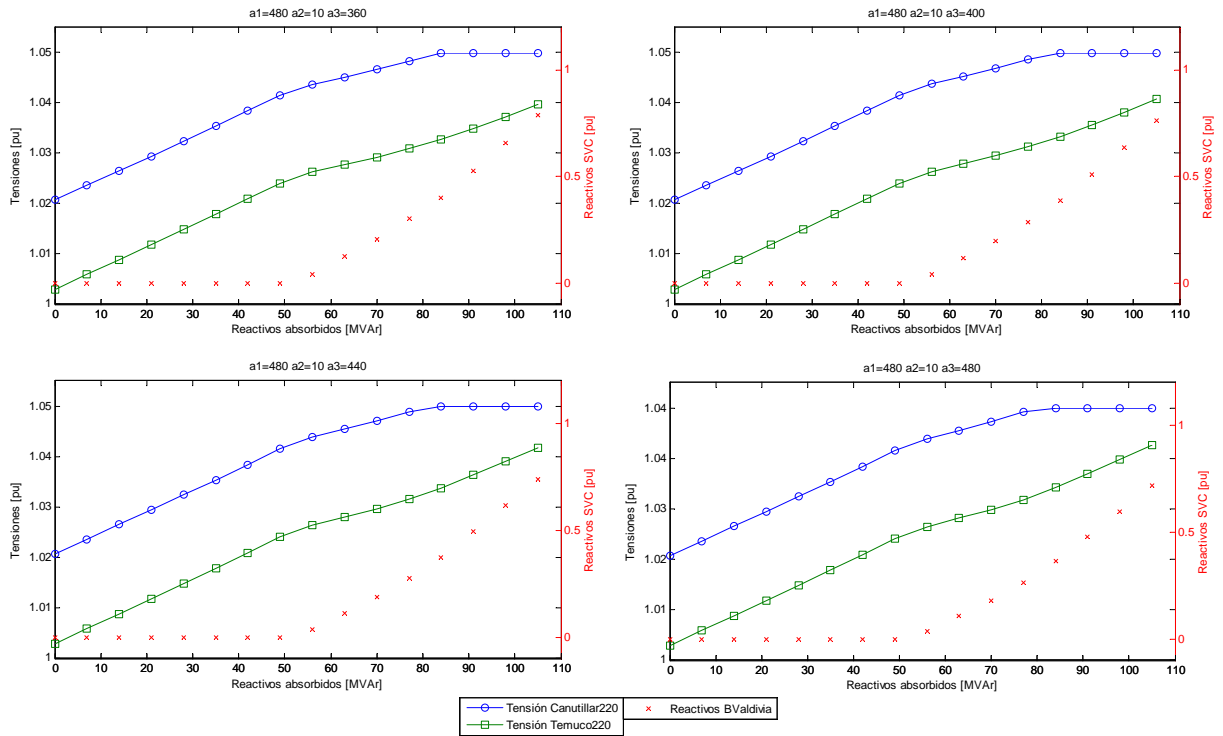


Ilustración A-6 "Valdivia12\_a1=360-480\_a2=10\_a3=10"

### A.3. Resultados Quillota.

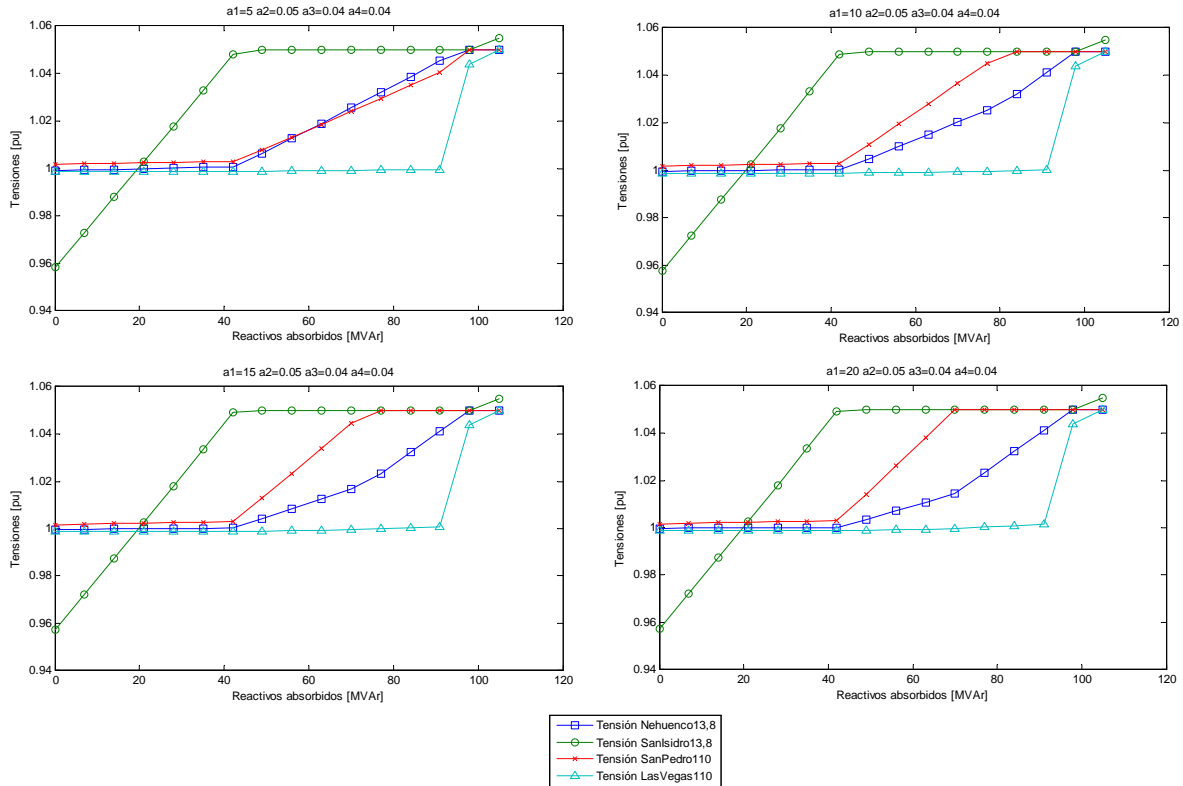


Ilustración A-7 "Quillota12\_a1=5-20\_a2=0.05\_a3=0.04\_a3=0.04"

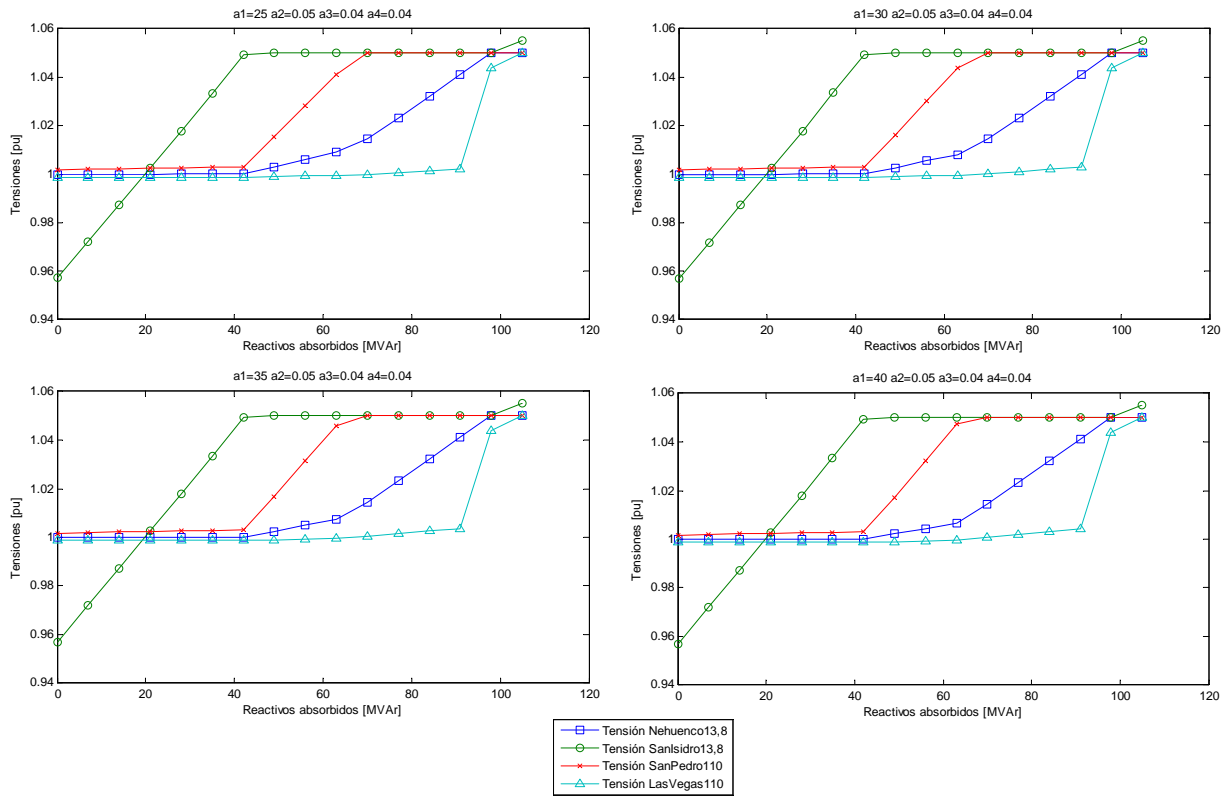


Ilustración A-8 "Quillota12\_a1=25-40\_a2=0.05\_a3=0.04\_a4=0.04"

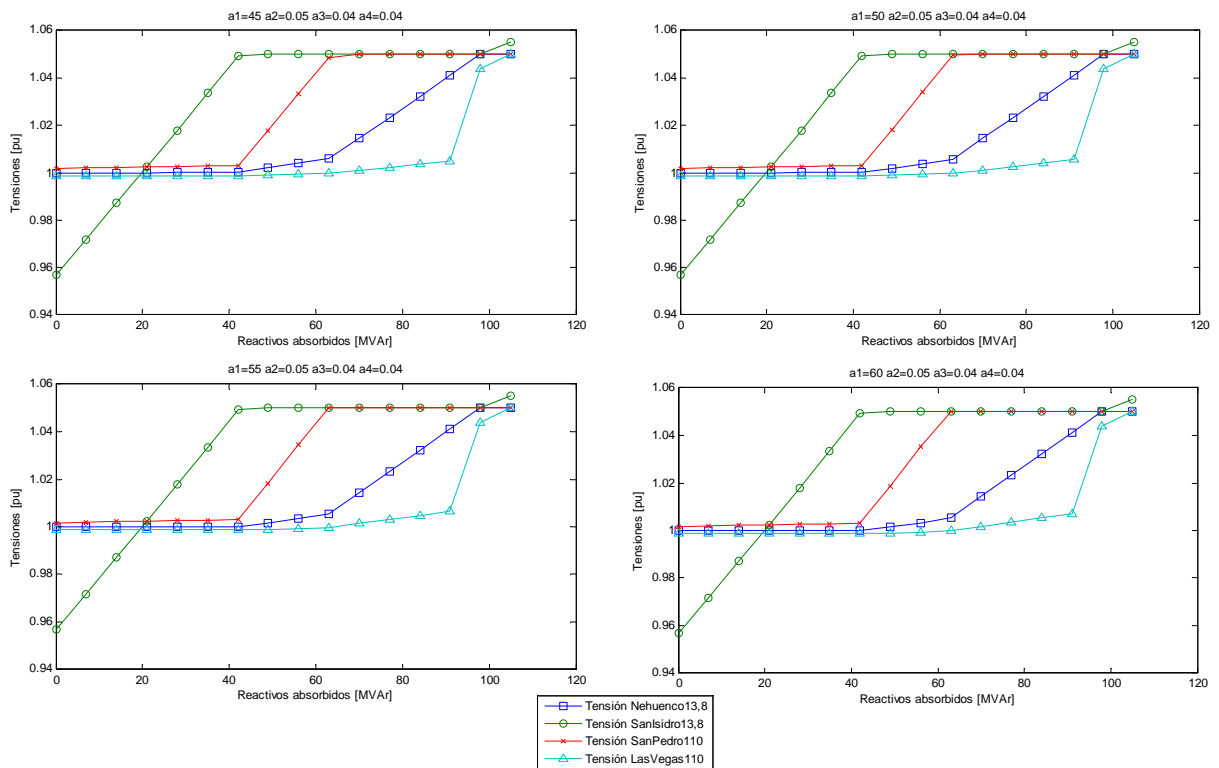


Ilustración A-9 "Quillota12\_a1=45-60\_a2=0.05\_a3=0.04\_a4=0.04"

## B. Resultados flujos de potencia.

En las siguientes tablas se presentan todos los resultados obtenidos al implementar los flujos de carga en el modelo estático del SIC de acuerdo a las indicaciones del método de control de tensión. En todas las tablas la primera columna corresponde al nivel de absorción de reactivos por parte de la barra eólica y las unidades de los datos corresponden a [MVar]; luego en las siguientes columnas se muestran los niveles de tensión y/o aporte reactivo necesario por parte de las barras controladoras, estos datos se muestran normalizados en [pu]; la columna siguiente corresponde a la tensión en la barra eólica obtenida en cada uno de los flujos implementados, estos datos se muestran en [kV]; por último la columna final corresponde a la tensión de la barra eólica en [pu]

### B.1. Resultados Cardones

Tabla B-1 "Cardones12\_a1=10\_a2=10\_a3=40"

Reactivos Absorbidos	Tensión Paposo220	Tensión Maitencillo220	Tensión Cardones220	Reactivos SVC Cardones	Tensión Cardones12	Valor Nominal Cardones12
0	1.040063	1.020217	1.002751	0.130728	11.972532	0.997711
7	1.040126	1.020436	1.002980	0.263174	11.972819	0.99773496
14	1.040190	1.020656	1.003208	0.395620	11.972655	0.99772125
21	1.040255	1.020881	1.003443	0.531551	11.973979	0.9978316
28	1.040322	1.021109	1.003681	0.669225	11.975814	0.99798447
35	1.040389	1.021340	1.003921	0.808642	11.978152	0.9981794
42	1.040457	1.021574	1.004165	0.949801	11.980992	0.998416
49	1.040526	1.021814	1.004414	1.094446	11.985293	0.99877447
56	1.040596	1.022057	1.004667	1.240834	11.990083	0.9991736
63	1.040668	1.022305	1.004926	1.390707	11.996304	0.99969196
70	1.040741	1.022557	1.005187	1.542322	12.003009	1.0002507
77	1.040815	1.022811	1.005452	1.695681	12.010177	1.000848
84	1.040890	1.023071	1.005723	1.852526	12.018758	1.0015632
91	1.040967	1.023337	1.005999	2.012853	12.028742	1.0023952
98	1.041046	1.023608	1.006282	2.176671	12.04011	1.0033425
105	1.041126	1.023885	1.006571	2.343969	12.052851	1.0044042

Tabla B-2 "Cardones12\_a1=10\_a2=10\_a3=80"

Reactivos Absorbidos	Tensión Paposo220	Tensión Maitencillo220	Tensión Cardones220	Reactivos SVC Cardones	Tensión Cardones12	Valor Nominal Cardones12
0	1.040121	1.020419	1.002965	0.126333	11.972348	0.9976957
7	1.040368	1.021267	1.003854	0.382320	11.972147	0.99767894
21	1.040494	1.021703	1.004311	0.513681	11.973335	0.99777794
28	1.040622	1.022144	1.004773	0.646727	11.975042	0.9979202
35	1.040751	1.022591	1.005242	0.781456	11.97727	0.9981058
42	1.040882	1.023043	1.005716	0.917870	11.98001	0.99833417
49	1.041017	1.023507	1.006203	1.057635	11.984226	0.99868554
56	1.041153	1.023975	1.006693	1.199118	11.988946	0.9990788
63	1.041291	1.024455	1.007196	1.343963	11.995125	0.99959373
70	1.041433	1.024941	1.007706	1.490471	12.001795	1.0001496
77	1.041576	1.025432	1.008221	1.638687	12.008958	1.0007465
84	1.041721	1.025935	1.008748	1.790245	12.017548	1.0014623
91	1.041870	1.026448	1.009286	1.945189	12.027558	1.0022966
98	1.042022	1.026974	1.009837	2.103491	12.038994	1.0032495
105	1.042178	1.027509	1.010399	2.265168	12.051812	1.0043176

**Tabla B-3 "Cardones12\_a1=10\_a2=10\_a3=120"**

Reactivos Absorbidos	Tensión Paposo220	Tensión Maitencillo220	Tensión Cardones220	Reactivos SVC Cardones	Tensión Cardones12	Valor Nominal Cardones12
0	1.040176	1.020608	1.003164	0.122224	11.972178	0.99768156
7	1.040355	1.021224	1.003811	0.246054	11.972149	0.99767905
14	1.040533	1.021839	1.004458	0.369885	11.971672	0.99763936
21	1.040717	1.022471	1.005123	0.496973	11.972725	0.9977271
28	1.040902	1.023111	1.005795	0.625692	11.97431	0.9978592
35	1.041090	1.023760	1.006476	0.756039	11.976438	0.99803644
42	1.041280	1.024416	1.007166	0.888016	11.979083	0.9982569
49	1.041475	1.025088	1.007873	1.023252	11.983218	0.9986015
56	1.041673	1.025769	1.008588	1.160117	11.987883	0.99899024
63	1.041875	1.026466	1.009320	1.300241	11.994018	0.99950147
70	1.042079	1.027171	1.010061	1.441994	12.000658	1.0000548
77	1.042286	1.027884	1.010810	1.585378	12.007806	1.0006505
84	1.042498	1.028613	1.011577	1.732012	12.016401	1.0013667
91	1.042713	1.029358	1.012360	1.881921	12.026443	1.0022036
98	1.042934	1.030120	1.013160	2.035076	12.037922	1.0031601
105	1.043160	1.030898	1.013978	2.191492	12.050823	1.0042353

**Tabla B-4 "Cardones12\_a1=10\_a2=10\_a3=160"**

Reactivos Absorbidos	Tensión Paposo220	Tensión Maitencillo220	Tensión Cardones220	Reactivos SVC Cardones	Tensión Cardones12	Valor Nominal Cardones12
0	1.040228	1.020785	1.003351	0.118374	11.97202	0.9976683
7	1.040458	1.021580	1.004188	0.238303	11.971834	0.9976528
14	1.040689	1.022375	1.005025	0.358233	11.9712305	0.9976025
21	1.040925	1.023191	1.005883	0.481318	11.972153	0.9976794
28	1.041165	1.024018	1.006753	0.605982	11.973633	0.99780273
35	1.041408	1.024855	1.007633	0.732224	11.975652	0.997971
42	1.041654	1.025702	1.008525	0.860043	11.978209	0.998184
49	1.041905	1.026571	1.009439	0.991019	11.982279	0.99852324
56	1.042160	1.027450	1.010363	1.123572	11.986877	0.99890643
63	1.042421	1.028350	1.011310	1.259282	11.992969	0.999414
70	1.042684	1.029260	1.012267	1.396578	11.99958	0.999965
77	1.042952	1.030180	1.013236	1.535444	12.006709	1.0005591
84	1.043225	1.031122	1.014227	1.677457	12.015314	1.0012761
91	1.043504	1.032085	1.015240	1.822637	12.025387	1.0021156
98	1.043789	1.033069	1.016275	1.970964	12.03691	1.0030758
105	1.044081	1.034073	1.017331	2.122460	12.049877	1.0041565

**Tabla B-5 "Cardones12\_a1=10\_a2=10\_a3=200"**

Reactivos Absorbidos	Tensión Paposo220	Tensión Maitencillo220	Tensión Cardones220	Reactivos SVC Cardones	Tensión Cardones12	Valor Nominal Cardones12
0	1.040276	1.020951	1.003527	0.114759	11.9718685	0.9976557
7	1.040555	1.021915	1.004541	0.231026	11.971548	0.997629
14	1.040835	1.022878	1.005556	0.347293	11.970813	0.9975677
21	1.041121	1.023867	1.006597	0.466620	11.971617	0.9976347
28	1.041412	1.024869	1.007652	0.587476	11.972988	0.99774903
35	1.041706	1.025883	1.008720	0.709860	11.974906	0.99790883
42	1.042004	1.026910	1.009801	0.833778	11.9773855	0.9981155
49	1.042309	1.027963	1.010909	0.960755	11.981388	0.998449
56	1.042618	1.029028	1.012030	1.089260	11.985929	0.9988274
63	1.042934	1.030118	1.013178	1.220825	11.991968	0.9993307
70	1.043253	1.031222	1.014340	1.353915	11.998556	0.99987966
77	1.043578	1.032337	1.015514	1.488554	12.005681	1.0004734
84	1.043908	1.033478	1.016716	1.626229	12.014282	1.0011902
91	1.044246	1.034645	1.017944	1.766974	12.024377	1.0020314
98	1.044592	1.035837	1.019199	1.910779	12.035944	1.0029954
105	1.044945	1.037054	1.020480	2.057642	12.048967	1.0040807

**Tabla B-6 "Cardones12\_a1=10\_a2=10\_a3=240"**

Reactivos Absorbidos	Tensión Paposo220	Tensión Maitencillo220	Tensión Cardones220	Reactivos SVC Cardones	Tensión Cardones12	Valor Nominal Cardones12
0	1.040321	1.021108	1.003692	0.111358	11.971732	0.99764436
7	1.040647	1.022230	1.004874	0.224180	11.971279	0.9976066
14	1.040972	1.023352	1.006056	0.337001	11.970425	0.9975354
21	1.041306	1.024503	1.007269	0.452792	11.971113	0.99759275
28	1.041644	1.025670	1.008497	0.570067	11.972384	0.9976987
35	1.041987	1.026851	1.009742	0.688826	11.974216	0.9978514
42	1.042333	1.028047	1.011001	0.809071	11.976614	0.99805117
49	1.042689	1.029272	1.012292	0.932288	11.98054	0.99837834
56	1.043048	1.030512	1.013598	1.056981	11.985021	0.9987517
63	1.043416	1.031782	1.014936	1.184648	11.991028	0.9992523
70	1.043789	1.033067	1.016289	1.313798	11.99759	0.9997992
77	1.044165	1.034366	1.017657	1.444434	12.004693	1.0003911
84	1.044551	1.035695	1.019057	1.578040	12.0133095	1.0011091
91	1.044945	1.037053	1.020487	1.714612	12.0234165	1.0019513
98	1.045347	1.038441	1.021949	1.854157	12.035017	1.0029181
105	1.045758	1.039858	1.023442	1.996666	12.048096	1.0040079

**Tabla B-7 "Cardones12\_a1=10\_a2=10\_a3=280"**

Reactivos Absorbidos	Tensión Paposo220	Tensión Maitencillo220	Tensión Cardones220	Reactivos SVC Cardones	Tensión Cardones12	Valor Nominal Cardones12
0	1.040364	1.021255	1.003848	0.108153	11.971596	0.997633
7	1.040733	1.022526	1.005187	0.217728	11.971014	0.9975845
14	1.041101	1.023798	1.006527	0.327302	11.970051	0.99750423
21	1.041480	1.025103	1.007902	0.439760	11.970643	0.9975536
28	1.041863	1.026424	1.009294	0.553660	11.971806	0.99765044
35	1.042251	1.027762	1.010704	0.669012	11.973554	0.9977961
42	1.042644	1.029118	1.012132	0.785786	11.975881	0.9979901
49	1.043046	1.030506	1.013595	0.905452	11.979736	0.99831134
56	1.043454	1.031911	1.015076	1.026566	11.984172	0.998681
63	1.043871	1.033350	1.016592	1.150551	11.990133	0.99917775
70	1.044293	1.034805	1.018125	1.275989	11.996661	0.99972177
77	1.044720	1.036278	1.019677	1.402863	12.003762	1.0003135
84	1.045157	1.037783	1.021263	1.532621	12.012369	1.0010308
91	1.045603	1.039322	1.022884	1.665276	12.022501	1.001875
98	1.046059	1.040895	1.024542	1.800791	12.034133	1.0028445
105	1.046525	1.042501	1.026234	1.939200	12.047267	1.0039389

**Tabla B-8 "Cardones12\_a1=10\_a2=10\_a3=320"**

Reactivos Absorbidos	Tensión Paposo220	Tensión Maitencillo220	Tensión Cardones220	Reactivos SVC Cardones	Tensión Cardones12	Valor Nominal Cardones12
0	1.040404	1.021394	1.003995	0.105128	11.971468	0.9976223
7	1.040814	1.022806	1.005483	0.211637	11.97077	0.99756414
14	1.041223	1.024219	1.006972	0.318146	11.9697	0.99747497
21	1.041644	1.025668	1.008500	0.427458	11.970183	0.99751526
28	1.042069	1.027137	1.010047	0.538171	11.971267	0.99760556
35	1.042501	1.028623	1.011614	0.650284	11.972925	0.9977438
42	1.042937	1.030129	1.013200	0.763803	11.975183	0.9979319
49	1.043384	1.031671	1.014826	0.880121	11.978978	0.99824816
56	1.043837	1.033232	1.016471	0.997839	11.983358	0.9986132
63	1.044300	1.034830	1.018156	1.118365	11.989282	0.9991068
70	1.044769	1.036447	1.019860	1.240290	11.995788	0.999649
77	1.045243	1.038083	1.021583	1.363619	12.002872	1.0002394
84	1.045728	1.039755	1.023346	1.489751	12.011481	1.0009568
91	1.046224	1.041465	1.025148	1.618678	12.021624	1.001802
98	1.046731	1.043212	1.026989	1.750413	12.033291	1.0027742
105	1.047248	1.044996	1.028869	1.884958	12.046474	1.0038729

**Tabla B-9 "Cardones12\_a1=10\_a2=10\_a3=360"**

Reactivos Absorbidos	Tensión Paposo220	Tensión Maitencillo220	Tensión Cardones220	Reactivos SVC Cardones	Tensión Cardones12	Valor Nominal Cardones12
0	1.040442	1.021526	1.004134	0.102267	11.971353	0.9976127
7	1.040891	1.023071	1.005763	0.205877	11.970541	0.99754506
14	1.041339	1.024617	1.007392	0.309488	11.969366	0.9974472
21	1.041799	1.026203	1.009065	0.415825	11.969755	0.9974796
28	1.042265	1.027810	1.010758	0.523525	11.970747	0.9975622
35	1.042736	1.029437	1.012473	0.632590	11.972331	0.99769425
42	1.043214	1.031085	1.014210	0.743016	11.974521	0.9978767
49	1.043704	1.032773	1.015990	0.856167	11.978262	0.9981885
56	1.044199	1.034481	1.017790	0.970686	11.982593	0.9985494
63	1.044706	1.036230	1.019634	1.087930	11.988478	0.9990398
70	1.045218	1.038000	1.021499	1.206543	11.994961	0.9995801
77	1.045738	1.039789	1.023386	1.326514	12.002021	1.0001684
84	1.046269	1.041620	1.025315	1.449203	12.010636	1.0008863
91	1.046812	1.043491	1.027288	1.574626	12.02079	1.0017325
98	1.047366	1.045403	1.029303	1.702775	12.032483	1.0027069
105	1.047932	1.047356	1.031361	1.833646	12.0457115	1.0038093

**Tabla B-10 "Cardones12\_a1=10\_a2=10\_a3=400"**

Reactivos Absorbidos	Tensión Paposo220	Tensión Maitencillo220	Tensión Cardones220	Reactivos SVC Cardones	Tensión Cardones12	Valor Nominal Cardones12
0	1.040479	1.021650	1.004265	0.099557	11.971235	0.99760294
7	1.040963	1.023322	1.006028	0.200423	11.970322	0.9975268
14	1.041448	1.024994	1.007791	0.301288	11.9690485	0.9974207
21	1.041946	1.026710	1.009600	0.404808	11.969353	0.99744606
28	1.042450	1.028448	1.011432	0.509655	11.97026	0.99752164
35	1.042960	1.030208	1.013288	0.615830	11.971772	0.9976477
42	1.043477	1.031990	1.015166	0.723332	11.973891	0.99782425
49	1.044006	1.033816	1.017091	0.833490	11.977576	0.99813133
56	1.044542	1.035664	1.019040	0.944971	11.981863	0.9984886
63	1.045091	1.037556	1.021034	1.059107	11.987717	0.9989764
70	1.045646	1.039470	1.023052	1.174572	11.994167	0.9995139
77	1.046207	1.041406	1.025093	1.291363	12.001218	1.0001014
84	1.046781	1.043385	1.027180	1.410816	12.009822	1.0008185
91	1.047368	1.045409	1.029314	1.532919	12.01999	1.0016658
98	1.047968	1.047478	1.031495	1.657658	12.031712	1.0026426
105	1.048580	1.049589	1.033721	1.785073	12.044971	1.0037476

**Tabla B-11 "Cardones12\_a1=10\_a2=10\_a3=440"**

Reactivos Absorbidos	Tensión Paposo220	Tensión Maitencillo220	Tensión Cardones220	Reactivos SVC Cardones	Tensión Cardones12	Valor Nominal Cardones12
0	1.040513	1.021768	1.004390	0.096988	11.971127	0.9975939
7	1.041032	1.023560	1.006279	0.195250	11.970116	0.99750966
14	1.041552	1.025352	1.008169	0.293512	11.968753	0.99739605
21	1.042085	1.027191	1.010107	0.394360	11.96897	0.9974142
28	1.042625	1.029053	1.012071	0.496501	11.969794	0.99748284
35	1.043171	1.030939	1.014060	0.599935	11.971233	0.99760276
42	1.043725	1.032849	1.016073	0.704658	11.97329	0.9977742
49	1.044293	1.034805	1.018136	0.811975	11.976919	0.9980766
56	1.044867	1.036786	1.020224	0.920581	11.981168	0.99843067
63	1.045455	1.038813	1.022362	1.031770	11.986979	0.9989149
70	1.046050	1.040864	1.024525	1.144256	11.993406	0.9994505
77	1.046651	1.042939	1.026712	1.258034	12.000446	1.0000372
84	1.047266	1.045060	1.028949	1.374398	12.0090475	1.000754
91	1.047895	1.047229	1.031236	1.493347	12.019225	1.001602
98	1.048538	1.049445	1.033573	1.614881	12.030967	1.0025805
105	1.049370	1.050000	1.034526	1.772243	12.04479	1.0037326

**Tabla B-12 "Cardones12\_a1=10\_a2=10\_a3=480"**

Reactivos Absorbidos	Tensión Paposo220	Tensión Maitencillo220	Tensión Cardones220	Reactivos SVC Cardones	Tensión Cardones12	Valor Nominal Cardones12
0	1.040545	1.021881	1.004509	0.094548	11.971031	0.99758595
7	1.041098	1.023786	1.006518	0.190337	11.96992	0.9974933
14	1.041650	1.025691	1.008527	0.286127	11.968461	0.99737173
21	1.042217	1.027647	1.010589	0.384438	11.968599	0.9973833
28	1.042792	1.029628	1.012678	0.484009	11.969358	0.99744654
35	1.043373	1.031633	1.014793	0.584841	11.970724	0.9975603
42	1.043962	1.033664	1.016934	0.686932	11.97272	0.9977267
49	1.044566	1.035745	1.019129	0.791547	11.976304	0.99802536
56	1.045176	1.037851	1.021350	0.897418	11.9805	0.998375
63	1.045801	1.040006	1.023623	1.005823	11.986278	0.9988565
70	1.046434	1.042188	1.025924	1.115461	11.992681	0.99939007
77	1.047074	1.044394	1.028249	1.226391	11.99971	0.99997586
84	1.047728	1.046651	1.030629	1.339815	12.008314	1.0006928
91	1.048397	1.048957	1.033061	1.455772	12.018494	1.0015411
98	1.049227	1.050000	1.034451	1.599746	12.030712	1.0025593
105	1.050000	1.050000	1.034875	1.768580	12.044744	1.0037286

**B.2. Resultados Quillota.**

**Tabla B-13 "Quillota12\_a1=5\_a2=0.05\_a3=0.04\_a3=0.04"**

Reactivos Absorbidos	Tensión Nehuenco13.8	Tensión SanIsidro13.8	Tensión SanPedro110	Tensión Las Vegas110	Tensión Cardones12	Valor Nominal Cardones12
0	0.999044	0.958461	1.001841	0.998687	11.59194	0.965995
7	0.999313	0.972979	1.002027	0.998690	11.631917	0.96932644
14	0.999589	0.987860	1.002217	0.998694	11.672871	0.9727392
21	0.999865	1.002741	1.002407	0.998698	11.7138	0.97615004
28	1.000141	1.017622	1.002597	0.998702	11.75471	0.9795592
35	1.000424	1.032866	1.002792	0.998706	11.797255	0.9831045
42	1.000707	1.048110	1.002987	0.998710	11.839817	0.9866514
49	1.000227	1.050000	1.007739	0.998806	11.882361	0.99019676
56	1.012678	1.050000	1.013168	0.998916	11.925889	0.99382406
63	1.018980	1.050000	1.018471	0.999024	11.968383	0.99736524
70	1.025582	1.050000	1.024026	0.999137	12.012869	1.0010724
77	1.032033	1.050000	1.029455	0.999247	12.056313	1.0046927
84	1.038635	1.050000	1.035010	0.999359	12.100742	1.0083952
91	1.045237	1.050000	1.040566	0.999472	12.145145	1.0120955
98	1.050000	1.050000	1.050000	1.043750	12.190078	1.0158398
105	1.055731	1.055731	1.050719	1.050719	12.235402	1.0196168

**Tabla B-14 "Quillota12\_a1=10\_a2=0.05\_a3=0.04\_a3=0.04"**

Reactivos Absorbidos	Tensión Nehuenco13.8	Tensión SanIsidro13.8	Tensión SanPedro110	Tensión Las Vegas110	Tensión Cardones12	Valor Nominal Cardones12
0	0.999514	0.957596	1.001831	0.998686	11.591945	0.9659954
7	0.999651	0.972358	1.002019	0.998690	11.631921	0.96932673
14	0.999791	0.987489	1.002213	0.998694	11.672874	0.9727395
21	0.999932	1.002619	1.002406	0.998698	11.713806	0.9761505
28	1.000072	1.017750	1.002599	0.998702	11.754713	0.9795594
35	1.000216	1.033249	1.002797	0.998706	11.797255	0.9831045
42	1.000359	1.048749	1.002995	0.998710	11.839811	0.98665094
49	1.004923	1.050000	1.010785	0.998868	11.882329	0.9901941
56	1.010024	1.050000	1.019371	0.999042	11.925826	0.9938188
63	1.015007	1.050000	1.027756	0.999212	11.96828	0.99735665
70	1.020227	1.050000	1.036541	0.999391	12.012721	1.0010601
77	1.025328	1.050000	1.045126	0.999565	12.049896	1.004158
84	1.032221	1.050000	1.050000	0.999685	12.087797	1.0073165
91	1.041196	1.050000	1.050000	1.000106	12.137384	1.0114487
98	1.050000	1.050000	1.050000	1.043750	12.190078	1.0158398
105	1.055731	1.055731	1.050719	1.050719	12.235402	1.0196168

**Tabla B-15 "Quillota12\_a1=15\_a2=0.05\_a3=0.04\_a3=0.04"**

Reactivos Absorbidos	Tensión Nehuenco13.8	Tensión SanIsidro13.8	Tensión SanPedro110	Tensión Las Vegas110	Tensión Cardones12	Valor Nominal Cardones12
0	0.999674	0.957302	1.001827	0.998686	11.591946	0.9659955
7	0.999766	0.972146	1.002017	0.998690	11.631922	0.9693268
14	0.999860	0.987362	1.002211	0.998694	11.6728735	0.97273946
21	0.999954	1.002578	1.002405	0.998698	11.713803	0.9761503
28	1.000048	1.017793	1.002599	0.998702	11.754709	0.9795591
35	1.000145	1.033380	1.002798	0.998706	11.797254	0.98310447
42	1.000241	1.048967	1.002997	0.998710	11.839812	0.986651
49	1.004071	1.050000	1.012777	0.998908	11.882311	0.9901926
56	1.008289	1.050000	1.023426	0.999124	11.925781	0.9938151
63	1.012409	1.050000	1.033826	0.999335	11.968202	0.99735016
70	1.016726	1.050000	1.044723	0.999556	12.002711	1.0002259
77	1.023240	1.050000	1.050000	0.999890	12.038778	1.0032315
84	1.032215	1.050000	1.050000	1.000350	12.08844	1.00737
91	1.041190	1.050000	1.050000	1.000809	12.138066	1.0115055
98	1.050000	1.050000	1.050000	1.043750	12.190078	1.0158398
105	1.055731	1.055731	1.050719	1.050719	12.235402	1.0196168

**Tabla B-16 "Quillota12\_a1=20\_a2=0.05\_a3=0.04\_a3=0.04"**

Reactivos Absorbidos	Tensión Nehuenco13.8	Tensión SanIsidro13.8	Tensión SanPedro110	Tensión Las Vegas110	Tensión Cardones12	Valor Nominal Cardones12
0	0.999755	0.957153	1.001825	0.998686	11.591946	0.9659955
7	0.999824	0.972039	1.002015	0.998690	11.63192	0.9693267
14	0.999895	0.987298	1.002210	0.998694	11.672874	0.9727395
21	0.999965	1.002557	1.002405	0.998698	11.713802	0.9761502
28	1.000036	1.017815	1.002600	0.998702	11.75471	0.9795592
35	1.000109	1.033446	1.002799	0.998706	11.797253	0.9831044
42	1.000181	1.049077	1.002999	0.998710	11.839811	0.98665094
49	1.003470	1.050000	1.014181	0.998937	11.882295	0.9901912
56	1.007066	1.050000	1.026284	0.999182	11.925748	0.9938123
63	1.010578	1.050000	1.038106	0.999422	11.968148	0.9973457
70	1.014467	1.050000	1.050000	0.999667	11.99043	0.9992025
77	1.023237	1.050000	1.050000	1.000287	12.0391655	1.0032638
84	1.032210	1.050000	1.050000	1.000899	12.088971	1.0074142
91	1.041184	1.050000	1.050000	1.001512	12.138747	1.0115622
98	1.050000	1.050000	1.050000	1.043750	12.190078	1.0158398
105	1.055731	1.055731	1.050719	1.050719	12.235402	1.0196168

**Tabla B-17 "Quillota12\_a1=25\_a2=0.05\_a3=0.04\_a3=0.04"**

Reactivos Absorbidos	Tensión Nehuenco13.8	Tensión SanIsidro13.8	Tensión SanPedro110	Tensión Las Vegas110	Tensión Cardones12	Valor Nominal Cardones12
0	0.999804	0.957063	1.001824	0.998686	11.591947	0.96599555
7	0.999859	0.971975	1.002015	0.998690	11.631923	0.9693269
14	0.999916	0.987260	1.002210	0.998694	11.672877	0.97273976
21	0.999972	1.002544	1.002405	0.998698	11.713802	0.9761502
28	1.000029	1.017829	1.002600	0.998702	11.754712	0.97955936
35	1.000087	1.033486	1.002800	0.998706	11.797253	0.9831044
42	1.000145	1.049143	1.003000	0.998710	11.83981	0.9866509
49	1.003024	1.050000	1.015224	0.998958	11.882285	0.99019045
56	1.006158	1.050000	1.028407	0.999226	11.925724	0.99381036
63	1.009218	1.050000	1.041284	0.999487	11.961439	0.9967866
70	1.014465	1.050000	1.050000	0.999935	11.990692	0.99922436
77	1.023233	1.050000	1.050000	1.000683	12.039547	1.0032955
84	1.032205	1.050000	1.050000	1.001449	12.089502	1.0074586
91	1.041178	1.050000	1.050000	1.002214	12.139428	1.011619
98	1.050000	1.050000	1.050000	1.043750	12.190078	1.0158398
105	1.055731	1.055731	1.050719	1.050719	12.235402	1.0196168



**Tabla B-18 "Quillota12\_a1=30\_a2=0.05\_a3=0.04\_a3=0.04"**

Reactivos Absorbidos	Tensión Nehuenco13.8	Tensión SanIsidro13.8	Tensión SanPedro110	Tensión Las Vegas110	Tensión Cardones12	Valor Nominal Cardones12
0	0.999836	0.957004	1.001824	0.998686	11.5919485	0.9659957
7	0.999882	0.971932	1.002014	0.998690	11.63192	0.9693267
14	0.999930	0.987234	1.002209	0.998694	11.672875	0.97273964
21	0.999977	1.002536	1.002405	0.998698	11.713806	0.9761505
28	1.000024	1.017838	1.002600	0.998702	11.754711	0.97955924
35	1.000073	1.033513	1.002800	0.998706	11.797255	0.9831045
42	1.000121	1.049188	1.003000	0.998710	11.839812	0.986651
49	1.002680	1.050000	1.016029	0.998974	11.882279	0.99018997
56	1.005456	1.050000	1.030047	0.999259	11.925702	0.9938085
63	1.008168	1.050000	1.043739	0.999537	11.955726	0.9963105
70	1.014463	1.050000	1.050000	1.000181	11.990931	0.9992442
77	1.023230	1.050000	1.050000	1.001079	12.039932	1.0033277
84	1.032201	1.050000	1.050000	1.001998	12.090039	1.0075033
91	1.041171	1.050000	1.050000	1.002917	12.140103	1.0116752
98	1.050000	1.050000	1.050000	1.043750	12.190078	1.0158398
105	1.055731	1.055731	1.050719	1.050719	12.235402	1.0196168

**Tabla B-19 "Quillota12\_a1=35\_a2=0.05\_a3=0.04\_a3=0.04"**

Reactivos Absorbidos	Tensión Nehuenco13.8	Tensión SanIsidro13.8	Tensión SanPedro110	Tensión Las Vegas110	Tensión Cardones12	Valor Nominal Cardones12
0	0.999859	0.956961	1.001823	0.998686	11.591946	0.9659955
7	0.999899	0.971901	1.002014	0.998690	11.631922	0.9693268
14	0.999940	0.987216	1.002209	0.998694	11.672876	0.9727397
21	0.999980	1.002530	1.002405	0.998698	11.713804	0.97615033
28	1.000021	1.017844	1.002600	0.998702	11.754713	0.9795594
35	1.000062	1.033532	1.002800	0.998706	11.797252	0.9831043
42	1.000104	1.049219	1.003000	0.998710	11.83981	0.9866509
49	1.002405	1.050000	1.016669	0.998987	11.882267	0.9901889
56	1.004898	1.050000	1.031351	0.999285	11.925686	0.99380714
63	1.007333	1.050000	1.045691	0.999576	11.951181	0.9959318
70	1.014461	1.050000	1.050000	1.000428	11.991172	0.9992643
77	1.023226	1.050000	1.050000	1.001475	12.040314	1.0033594
84	1.032196	1.050000	1.050000	1.002547	12.0905695	1.0075475
91	1.041165	1.050000	1.050000	1.003619	12.140784	1.011732
98	1.050000	1.050000	1.050000	1.043750	12.190078	1.0158398
105	1.055731	1.055731	1.050719	1.050719	12.235402	1.0196168

**Tabla B-20 "Quillota12\_a1=40\_a2=0.05\_a3=0.04\_a3=0.04"**

Reactivos Absorbidos	Tensión Nehuenco13.8	Tensión SanIsidro13.8	Tensión SanPedro110	Tensión Las Vegas110	Tensión Cardones12	Valor Nominal Cardones12
0	0.999877	0.956929	1.001823	0.998686	11.591949	0.9659958
7	0.999912	0.971878	1.002014	0.998690	11.631925	0.96932703
14	0.999947	0.987202	1.002209	0.998694	11.672874	0.9727395
21	0.999983	1.002525	1.002405	0.998698	11.713806	0.9761505
28	1.000018	1.017849	1.002600	0.998702	11.754711	0.97955924
35	1.000055	1.033546	1.002800	0.998706	11.797254	0.98310447
42	1.000091	1.049243	1.003001	0.998710	11.839811	0.98665094
49	1.002182	1.050000	1.017191	0.998998	11.882263	0.9901886
56	1.004444	1.050000	1.032413	0.999307	11.925674	0.9938062
63	1.006652	1.050000	1.047281	0.999608	11.9474745	0.9956229
70	1.014459	1.050000	1.050000	1.000674	11.991411	0.99928427
77	1.023223	1.050000	1.050000	1.001871	12.0407	1.0033916
84	1.032191	1.050000	1.050000	1.003096	12.091101	1.0075917
91	1.041159	1.050000	1.050000	1.004321	12.141465	1.0117887
98	1.050000	1.050000	1.050000	1.043750	12.190078	1.0158398
105	1.055731	1.055731	1.050719	1.050719	12.235402	1.0196168

**Tabla B-21 "Quillota12\_a1=45\_a2=0.05\_a3=0.04\_a3=0.04"**

Reactivos Absorbidos	Tensión Nehuenco13.8	Tensión SanIsidro13.8	Tensión SanPedro110	Tensión Las Vegas110	Tensión Cardones12	Valor Nominal Cardones12
7	0.999921	0.971860	1.002013	0.998690	11.631919	0.96932656
14	0.999953	0.987191	1.002209	0.998694	11.672874	0.9727395
21	0.999985	1.002522	1.002405	0.998698	11.713808	0.9761507
28	1.000016	1.017852	1.002600	0.998702	11.754709	0.9795591
35	1.000049	1.033557	1.002801	0.998706	11.7972555	0.98310465
42	1.000081	1.049262	1.003001	0.998710	11.839812	0.986651
49	1.001997	1.050000	1.017624	0.999007	11.882259	0.9901883
56	1.004066	1.050000	1.033295	0.999325	11.92566	0.993805
63	1.006087	1.050000	1.048601	0.999635	11.944399	0.9953666
70	1.014457	1.050000	1.050000	1.000921	11.991652	0.9993043
77	1.023220	1.050000	1.050000	1.002267	12.041086	1.0034238
84	1.032186	1.050000	1.050000	1.003645	12.091631	1.007636
91	1.041153	1.050000	1.050000	1.005022	12.142143	1.0118452
98	1.050000	1.050000	1.050000	1.043750	12.190078	1.0158398
105	1.055731	1.055731	1.050719	1.050719	12.235402	1.0196168

**Tabla B-22 "Quillota12\_a1=50\_a2=0.05\_a3=0.04\_a3=0.04"**

Reactivos Absorbidos	Tensión Nehuenco13.8	Tensión SanIsidro13.8	Tensión SanPedro110	Tensión Las Vegas110	Tensión Cardones12	Valor Nominal Cardones12
0	0.999901	0.956883	1.001822	0.998686	11.591944	0.9659953
7	0.999929	0.971846	1.002013	0.998690	11.631922	0.9693268
14	0.999958	0.987182	1.002209	0.998694	11.672875	0.97273964
21	0.999986	1.002519	1.002405	0.998698	11.713805	0.97615045
28	1.000015	1.017855	1.002600	0.998702	11.754713	0.9795594
35	1.000044	1.033566	1.002801	0.998706	11.797255	0.9831045
42	1.000073	1.049276	1.003001	0.998710	11.83981	0.9866509
49	1.001841	1.050000	1.017989	0.999014	11.8822565	0.99018806
56	1.003748	1.050000	1.034038	0.999340	11.925651	0.9938042
63	1.005611	1.050000	1.049714	0.999658	11.941809	0.99515074
70	1.014454	1.050000	1.050000	1.001167	11.991885	0.9993238
77	1.023216	1.050000	1.050000	1.002663	12.041467	1.0034555
84	1.032182	1.050000	1.050000	1.004193	12.092166	1.0076805
91	1.041147	1.050000	1.050000	1.005723	12.142823	1.011902
98	1.050000	1.050000	1.050000	1.043750	12.190078	1.0158398
105	1.055731	1.055731	1.050719	1.050719	12.235402	1.0196168

**Tabla B-23 "Quillota12\_a1=55\_a2=0.05\_a3=0.04\_a3=0.04"**

Reactivos Absorbidos	Tensión Nehuenco13.8	Tensión SanIsidro13.8	Tensión SanPedro110	Tensión Las Vegas110	Tensión Cardones12	Valor Nominal Cardones12
0	0.999910	0.956867	1.001822	0.998686	11.591946	0.9659955
7	0.999936	0.971834	1.002013	0.998690	11.631925	0.96932703
14	0.999962	0.987175	1.002209	0.998694	11.672876	0.9727397
21	0.999987	1.002516	1.002405	0.998698	11.713802	0.9761502
28	1.000013	1.017858	1.002600	0.998702	11.75471	0.9795592
35	1.000040	1.033573	1.002801	0.998706	11.797254	0.98310447
42	1.000066	1.049289	1.003001	0.998710	11.83981	0.9866509
49	1.001707	1.050000	1.018301	0.999021	11.882251	0.9901876
56	1.003476	1.050000	1.034674	0.999353	11.925643	0.99380356
63	1.005489	1.050000	1.050000	0.999674	11.941155	0.99509627
70	1.014452	1.050000	1.050000	1.001414	11.9921255	0.9993438
77	1.023213	1.050000	1.050000	1.003059	12.041853	1.0034877
84	1.032177	1.050000	1.050000	1.004742	12.092696	1.0077246
91	1.041141	1.050000	1.050000	1.006425	12.143503	1.0119586
98	1.050000	1.050000	1.050000	1.043750	12.190078	1.0158398
105	1.055731	1.055731	1.050719	1.050719	12.235402	1.0196168

**Tabla B-24 "Quillota12\_a1=60\_a2=0.05\_a3=0.04\_a3=0.04"**

Reactivos Absorbidos	Tensión Nehuenco13.8	Tensión SanIsidro13.8	Tensión SanPedro110	Tensión Las Vegas110	Tensión Cardones12	Valor Nominal Cardones12
0	0.999918	0.956853	1.001822	0.998686	11.591948	0.9659956
7	0.999941	0.971824	1.002013	0.998690	11.631923	0.9693269
14	0.999965	0.987169	1.002209	0.998694	11.672875	0.97273964
21	0.999988	1.002515	1.002404	0.998698	11.713802	0.9761502
28	1.000012	1.017860	1.002600	0.998702	11.754711	0.97955924
35	1.000036	1.033579	1.002801	0.998706	11.79725	0.98310417
42	1.000061	1.049299	1.003001	0.998710	11.839812	0.986651
49	1.001592	1.050000	1.018571	0.999026	11.882251	0.9901876
56	1.003241	1.050000	1.035224	0.999364	11.925636	0.993803
63	1.005488	1.050000	1.050000	0.999688	11.941165	0.9950971
70	1.014450	1.050000	1.050000	1.001660	11.992364	0.99936366
77	1.023209	1.050000	1.050000	1.003454	12.0422325	1.0035194
84	1.032172	1.050000	1.050000	1.005290	12.0932255	1.0077688
91	1.041135	1.050000	1.050000	1.007126	12.144182	1.0120152
98	1.050000	1.050000	1.050000	1.043750	12.190078	1.0158398
105	1.055731	1.055731	1.050719	1.050719	12.235402	1.0196168

**B.3. Resultados Valdivia.**

**Tabla B-25 "Valdivia12\_a1=40\_a2=10\_a3=10"**

Reactivos Absorbidos	Reactivos Valdivia220	Tensión Canutillar220	Tensión Temuco220	Tensión Valdivia12	Valor Nominal Valdivia12
0	0.000000	1.020777	1.003022	11.517515	0.9597929
7	0.000000	1.023638	1.005929	11.556219	0.96301824
14	0.000000	1.026530	1.008868	11.595318	0.96627647
21	0.000000	1.029456	1.011840	11.634844	0.96957034
28	0.000000	1.032415	1.014846	11.67479	0.9728992
35	0.000000	1.035410	1.017889	11.7151985	0.97626656
42	0.000000	1.038441	1.020968	11.756061	0.9796717
49	0.000000	1.041509	1.024085	11.797399	0.98311657
56	0.070784	1.043138	1.025740	11.853346	0.98777884
63	0.208608	1.043406	1.026012	11.922556	0.9935463
70	0.348287	1.043678	1.026289	11.9918995	0.999325
77	0.509154	1.043991	1.026607	12.07078	1.0058984
84	0.672845	1.044309	1.026929	12.150005	1.0125004
91	0.839279	1.044633	1.027259	12.229551	1.0191293
98	1.008658	1.044963	1.027594	12.309481	1.0257901
105	1.181147	1.045299	1.027935	12.38986	1.0324883

**Tabla B-26 "Valdivia12\_a1=80\_a2=10\_a3=10"**

Reactivos Absorbidos	Reactivos Valdivia220	Tensión Canutillar220	Tensión Temuco220	Tensión Valdivia12	Valor Nominal Valdivia12
0	0.000000	1.020777	1.003022	11.517515	0.9597929
7	0.000000	1.023638	1.005929	11.556219	0.96301824
14	0.000000	1.026530	1.008868	11.595318	0.96627647
21	0.000000	1.029456	1.011840	11.634844	0.96957034
28	0.000000	1.032415	1.014846	11.67479	0.9728992
35	0.000000	1.035410	1.017889	11.7151985	0.97626656
42	0.000000	1.038441	1.020968	11.756061	0.9796717
49	0.000000	1.041509	1.024085	11.797399	0.98311657
56	0.065228	1.043254	1.025858	11.8522415	0.9876868
63	0.192233	1.043748	1.026360	11.919368	0.99328065
70	0.320946	1.044249	1.026869	11.986674	0.9988895
77	0.469199	1.044826	1.027455	12.063321	1.0052768
84	0.620015	1.045413	1.028051	12.140364	1.0116969
91	0.773392	1.046010	1.028658	12.217794	1.0181495
98	0.929481	1.046618	1.029275	12.29567	1.0246391
105	1.088429	1.047236	1.029904	12.374042	1.0311701

**Tabla B-27 "Valdivia12\_a1=120\_a2=10\_a3=10"**

Reactivos Absorbidos	Reactivos Valdivia220	Tensión Canutillar220	Tensión Temuco220	Tensión Valdivia12	Valor Nominal Valdivia12
0	0.000000	1.020777	1.003022	11.517515	0.9597929
7	0.000000	1.023638	1.005929	11.556219	0.96301824
14	0.000000	1.026530	1.008868	11.595318	0.96627647
21	0.000000	1.029456	1.011840	11.634844	0.96957034
28	0.000000	1.032415	1.014846	11.67479	0.9728992
35	0.000000	1.035410	1.017889	11.7151985	0.97626656
42	0.000000	1.038441	1.020968	11.756061	0.9796717
49	0.000000	1.041509	1.024085	11.797399	0.98311657
56	0.060480	1.043353	1.025959	11.851296	0.987608
63	0.178241	1.044041	1.026657	11.916645	0.99305373
70	0.297585	1.044737	1.027365	11.9822035	0.998517
77	0.435046	1.045540	1.028180	12.056928	1.0047439
84	0.574884	1.046356	1.029010	12.132096	1.011008
91	0.717101	1.047187	1.029853	12.207705	1.0173087
98	0.861831	1.048032	1.030711	12.283801	1.02365
105	1.009221	1.048891	1.031586	12.360443	1.0300369

**Tabla B-28 "Valdivia12\_a1=160\_a2=10\_a3=10"**

Reactivos Absorbidos	Reactivos Valdivia220	Tensión Canutillar220	Tensión Temuco220	Tensión Valdivia12	Valor Nominal Valdivia12
0	0.000000	1.020777	1.003022	11.517515	0.9597929
7	0.000000	1.023638	1.005929	11.556219	0.96301824
14	0.000000	1.026530	1.008868	11.595318	0.96627647
21	0.000000	1.029456	1.011840	11.634844	0.96957034
28	0.000000	1.032415	1.014846	11.67479	0.9728992
35	0.000000	1.035410	1.017889	11.7151985	0.97626656
42	0.000000	1.038441	1.020968	11.756061	0.9796717
49	0.000000	1.041509	1.024085	11.797399	0.98311657
56	0.056377	1.043439	1.026046	11.850484	0.9875403
63	0.166148	1.044293	1.026914	11.91428	0.9928567
70	0.277396	1.045159	1.027794	11.978336	0.9981947
77	0.405537	1.046157	1.028807	12.051394	1.0042828
84	0.535887	1.047171	1.029837	12.124924	1.0104103
91	0.668450	1.048203	1.030886	12.19894	1.0165783
98	0.803357	1.049253	1.031953	12.273486	1.0227906
105	0.947124	1.050000	1.033090	12.348955	1.0290796

**Tabla B-29 "Valdivia12\_a1=200\_a2=10\_a3=10"**

Reactivos Absorbidos	Reactivos Valdivia220	Tensión Canutillar220	Tensión Temuco220	Tensión Valdivia12	Valor Nominal Valdivia12
0	0.000000	1.020777	1.003022	11.517515	0.9597929
7	0.000000	1.023638	1.005929	11.556219	0.96301824
14	0.000000	1.026530	1.008868	11.595318	0.96627647
21	-0.000000	1.029456	1.011840	11.634844	0.96957034
28	0.000000	1.032415	1.014846	11.67479	0.9728992
35	0.000000	1.035410	1.017889	11.7151985	0.97626656
42	0.000000	1.038441	1.020968	11.756061	0.9796717
49	0.000000	1.041509	1.024085	11.797399	0.98311657
56	0.052795	1.043514	1.026122	11.849772	0.98748106
63	0.155592	1.044514	1.027138	11.91222	0.992685
70	0.259771	1.045528	1.028168	11.974959	0.9979133
77	0.379764	1.046695	1.029354	12.046539	1.0038782
84	0.501835	1.047883	1.030560	12.1186495	1.0098875
91	0.625975	1.049091	1.031788	12.19127	1.0159391
98	0.758407	1.050000	1.033097	12.26474	1.0220617
105	0.910896	1.050000	1.034604	12.339582	1.0282985

**Tabla B-30 "Valdivia12\_a1=240\_a2=10\_a3=10"**

Reactivos Absorbidos	Reactivos Valdivia220	Tensión Canutillar220	Tensión Temuco220	Tensión valdivia12	Valor Nominal valdivia12
0	0.000000	1.020777	1.003022	11.517515	0.9597929
7	0.000000	1.023638	1.005929	11.556219	0.96301824
14	0.000000	1.026530	1.008868	11.595318	0.96627647
21	0.000000	1.029456	1.011840	11.634844	0.96957034
28	0.000000	1.032415	1.014846	11.67479	0.9728992
35	0.000000	1.035410	1.017889	11.7151985	0.97626656
42	0.000000	1.038441	1.020968	11.756061	0.9796717
49	0.000000	1.041509	1.024085	11.797399	0.98311657
56	0.049641	1.043580	1.026189	11.849146	0.98742884
63	0.146296	1.044708	1.027335	11.910399	0.99253327
70	0.244260	1.045852	1.028497	11.971974	0.9976645
77	0.357085	1.047170	1.029835	12.042272	1.0035226
84	0.471850	1.048509	1.031197	12.113102	1.0094252
91	0.588573	1.049872	1.032582	12.184485	1.0153738
98	0.730466	1.050000	1.034265	12.257376	1.021448
105	0.877337	1.050000	1.036007	12.330879	1.0275732

**Tabla B-31 "Valdivia12\_a1=280\_a2=10\_a3=10"**

Reactivos Absorbidos	Reactivos Valdivia220	Tensión Canutillar220	Tensión Temuco220	Tensión valdivia12	Valor Nominal valdivia12
0	0.000000	1.020777	1.003022	11.517515	0.9597929
7	0.000000	1.023638	1.005929	11.556219	0.96301824
14	0.000000	1.026530	1.008868	11.595318	0.96627647
21	0.000000	1.029456	1.011840	11.634844	0.96957034
28	0.000000	1.032415	1.014846	11.67479	0.9728992
35	0.000000	1.035410	1.017889	11.7151985	0.97626656
42	0.000000	1.038441	1.020968	11.756061	0.9796717
49	0.000000	1.041509	1.024085	11.797399	0.98311657
56	0.046842	1.043638	1.026248	11.848582	0.9873819
63	0.138049	1.044881	1.027511	11.908794	0.9923995
70	0.230483	1.046140	1.028790	11.969326	0.99744385
77	0.336949	1.047590	1.030263	12.038465	1.0032054
84	0.445251	1.049065	1.031762	12.108177	1.0090147
91	0.565406	1.050000	1.033425	12.1788025	1.0149002
98	0.704511	1.050000	1.035350	12.25052	1.0208766
105	0.846163	1.050000	1.037310	12.322773	1.0268978

**Tabla B-32 "Valdivia12\_a1=320\_a2=10\_a3=10"**

Reactivos Absorbidos	Reactivos Valdivia220	Tensión Canutillar220	Tensión Temuco220	Tensión valdivia12	Valor Nominal valdivia12
0	0.000000	1.020777	1.003022	11.517515	0.9597929
7	0.000000	1.023638	1.005929	11.556219	0.96301824
14	0.000000	1.026530	1.008868	11.595318	0.96627647
21	0.000000	1.029456	1.011840	11.634844	0.96957034
28	0.000000	1.032415	1.014846	11.67479	0.9728992
35	0.000000	1.035410	1.017889	11.7151985	0.97626656
42	0.000000	1.038441	1.020968	11.756061	0.9796717
49	0.000000	1.041509	1.024085	11.797399	0.98311657
56	0.044343	1.043690	1.026301	11.8480835	0.9873403
63	0.130682	1.045034	1.027667	11.907343	0.9922786
70	0.218190	1.046397	1.029050	11.966954	0.9972462
77	0.318976	1.047966	1.030644	12.035067	1.0029222
84	0.421490	1.049562	1.032266	12.103767	1.0086473
91	0.546005	1.050000	1.034236	12.173589	1.0144657
98	0.680337	1.050000	1.036361	12.244125	1.0203438
105	0.817129	1.050000	1.038524	12.315208	1.0262674

**Tabla B-33 "Valdivia12\_a1=360\_a2=10\_a3=10"**

Reactivos Absorbidos	Reactivos Valdivia220	Tensión Canutillar220	Tensión Temuco220	Tensión Valdivia12	Valor Nominal Valdivia12
0	0.000000	1.020777	1.003022	11.517515	0.9597929
7	0.000000	1.023638	1.005929	11.556219	0.96301824
14	0.000000	1.026530	1.008868	11.595318	0.96627647
21	0.000000	1.029456	1.011840	11.634844	0.96957034
28	0.000000	1.032415	1.014846	11.67479	0.9728992
35	0.000000	1.035410	1.017889	11.7151985	0.97626656
42	0.000000	1.038441	1.020968	11.756061	0.9796717
49	0.000000	1.041509	1.024085	11.797399	0.98311657
56	0.042096	1.043737	1.026349	11.847638	0.9873032
63	0.124062	1.045173	1.027807	11.906049	0.99217075
70	0.207130	1.046628	1.029286	11.964827	0.9970689
77	0.302808	1.048303	1.030988	12.032	1.0026666
84	0.400269	1.050000	1.032722	12.099798	1.0083165
91	0.527892	1.050000	1.034993	12.168714	1.0140594
98	0.657767	1.050000	1.037304	12.23814	1.019845
105	0.790021	1.050000	1.039657	12.308128	1.0256773

**Tabla B-34 "Valdivia12\_a1=400\_a2=10\_a3=10"**

Reactivos Absorbidos	Reactivos Valdivia220	Tensión Canutillar220	Tensión Temuco220	Tensión Valdivia12	Valor Nominal Valdivia12
0	0.000000	1.020777	1.003022	11.517515	0.9597929
7	0.000000	1.023638	1.005929	11.556219	0.96301824
14	0.000000	1.026530	1.008868	11.595318	0.96627647
21	0.000000	1.029456	1.011840	11.634844	0.96957034
28	0.000000	1.032415	1.014846	11.67479	0.9728992
35	0.000000	1.035410	1.017889	11.7151985	0.97626656
42	0.000000	1.038441	1.020968	11.756061	0.9796717
49	0.000000	1.041509	1.024085	11.797399	0.98311657
56	0.040067	1.043780	1.026392	11.847239	0.9872699
63	0.118080	1.045298	1.027935	11.904881	0.99207336
70	0.197149	1.046837	1.029497	11.962899	0.99690825
77	0.288210	1.048609	1.031298	12.029241	1.0024368
84	0.387417	1.050000	1.033259	12.096283	1.0080236
91	0.510941	1.050000	1.035702	12.164147	1.0136789
98	0.636647	1.050000	1.038187	12.232532	1.0193776
105	0.764654	1.050000	1.040718	12.301494	1.0251244

**Tabla B-35 "Valdivia12\_a1=440\_a2=10\_a3=10"**

Reactivos Absorbidos	Reactivos Valdivia220	Tensión Canutillar220	Tensión Temuco220	Tensión Valdivia12	Valor Nominal Valdivia12
0	0.000000	1.020777	1.003022	11.517515	0.9597929
7	0.000000	1.023638	1.005929	11.556219	0.96301824
14	0.000000	1.026530	1.008868	11.595318	0.96627647
21	-0.000000	1.029456	1.011840	11.634844	0.96957034
28	0.000000	1.032415	1.014846	11.67479	0.9728992
35	0.000000	1.035410	1.017889	11.7151985	0.97626656
42	0.000000	1.038441	1.020968	11.756061	0.9796717
49	0.000000	1.041509	1.024085	11.797399	0.98311657
56	0.038223	1.043818	1.026431	11.846867	0.9872389
63	0.112648	1.045411	1.028050	11.90381	0.9919841
70	0.188081	1.047026	1.029690	11.961146	0.9967622
77	0.274950	1.048886	1.031580	12.026724	1.002227
84	0.375364	1.050000	1.033763	12.092984	1.0077487
91	0.495046	1.050000	1.036366	12.159856	1.0133213
98	0.616840	1.050000	1.039015	12.227264	1.0189387
105	0.740865	1.050000	1.041712	12.295255	1.0246046

**Tabla B-36 "Valdivia12\_a1=480\_a2=10\_a3=10"**

Reactivos Absorbidos	Reactivos Valdivia220	Tensión Canutillar220	Tensión Temuco220	Tensión Valdivia12	Valor Nominal valdivia12
0	0.000000	1.020777	1.003022	11.517515	0.9597929
7	0.000000	1.023638	1.005929	11.556219	0.96301824
14	0.000000	1.026530	1.008868	11.595318	0.96627647
21	0.000000	1.029456	1.011840	11.634844	0.96957034
28	0.000000	1.032415	1.014846	11.67479	0.9728992
35	0.000000	1.035410	1.017889	11.7151985	0.97626656
42	0.000000	1.038441	1.020968	11.756061	0.9796717
49	0.000000	1.041509	1.024085	11.797399	0.98311657
56	0.036542	1.043853	1.026467	11.846532	0.987211
63	0.107694	1.045515	1.028155	11.902841	0.99190336
70	0.179809	1.047199	1.029865	11.959546	0.9966288
77	0.262859	1.049138	1.031836	12.024418	1.0020348
84	0.364038	1.050000	1.034237	12.089883	1.0074903
91	0.480109	1.050000	1.036990	12.155819	1.0129849
98	0.598229	1.050000	1.039793	12.222306	1.0185255
105	0.718511	1.050000	1.042646	12.289382	1.0241152

## B.4 Implementación de la optimización.

A continuación se muestra la rutina Matlab creada para la implementación del método de control de tensión del caso de estudio Cardones, para los demás casos el código es análogo y solo varían los datos que parametrizan las funciones de influencia.

```
%-----OPTIMIZADOR-----
%-----Datos funciones de influencia-----
m1=0.014641608391608
n1=0.0001
m2=0.050494247285691
n2=-0.0019
m3=0.005538571428571*100
n3=0.028785714285714
k4=0.89513518
k5=1.25480952
h1=0.58616521
h2=10.4007204
dV=0.912
a1=10 %Peso BPaposo220 TalTal
a2=10 %Peso BMaitencillo200 Guacolda
Q=[0 7 14 21 28 35 42 49 56 63 70 77 84 91 98 105] %perfil de absorción de Reactivos
for j=1:1:12
    a3=40*j %Peso BCardones220 SVC
    l=[0.81 0.734 0.658 0.58 0.501 0.421 0.34 0.257 0.173 0.087 0 -0.088 -0.178 -0.27 -0.364 -0.46]
    for i=1:1:16
        [x,fmin]=fmincon(@(x)myfuncardones(x,[a1 a2 a3]),[0,0,0],[[],[],[m1,m2,m3],[dV-1(:,i)-n1-n2-n3],[-19.8,-
15.4,-55],[2.2,6.6,45])
        y2(i,:,j)=[x(1)/220+1.04,x(2)/220+1.02,(-
0.00531657*x(3)+10.998835)/220+x(2)*k4/220+(x(1)*m3+n3)/220+0.9524,x(3)]
    end
end
%-----Lineas-de-Comando-para-graficar-e-imprimir-archivos-txt-----
for k=1:1:12
    if k<5
        figure(1)
        subplot(2,2,k)
        [grafico,H1,H2]=plotyy(Q,y2(1:16,1:2,k),Q,y2(1:16,4,k),'plot')
        set(grafico,'XLim',[0 110])
        set(grafico(1),'YLim',[1 1.05])
        set(grafico(2),'YLim',[0 2.5])
        set(H2,'LineStyle','x')
        set(H1(1:,:),'Marker','o')
        set(H1(2:,:),'Marker','s')
        set(get(grafico(1),'Ylabel'),'String','Tensiones [pu]')
        set(get(grafico(2),'Ylabel'),'String','Reactivos SVC [pu]')
        title(strcat('a1=',num2str(a1) , ' a2=',num2str(a2), ' b1=',num2str(40*k)))
        xlabel('Reactivos absorbidos [MVar]')
        h2 = legend(H1,'Paposo220', 'Maitencillo220','Location','best');
        h2 = legend(H2,'Reactivos SVC','Location','best');
        fi=fopen(strcat('CardonesI2_a1=',num2str(a1) ,'_a2=',num2str(a2) ,'_a3=',num2str(40*k) ,'.txt'),'wt')
        for i=1:1:16
            fprintf(fi,'%d',Q(i))
            fprintf(fi,'%s',' ')
            for j=1:1:4
                fprintf(fi,'%f',y2(i,j,k))
                fprintf(fi,'%s',' ')
            end
            fprintf(fi,'\n')
        end
        fclose(fi)
    elseif k<9
        figure(2)
        subplot(2,2,k-4)
        [grafico,H1,H2]=plotyy(Q,y2(1:16,1:2,k),Q,y2(1:16,4,k),'plot')
        set(grafico,'XLim',[0 110])
        set(grafico(1),'YLim',[1 1.05])
        set(grafico(2),'YLim',[0 2.5]) set(H2,'LineStyle','x')
        set(H1(1:,:),'Marker','o') set(H1(2:,:),'Marker','s')
        set(get(grafico(1),'Ylabel'),'String','Tensiones [pu]')
        set(get(grafico(2),'Ylabel'),'String','Reactivos SVC [pu]')
        title(strcat('a1=',num2str(a1) , ' a2=',num2str(a2), ' b1=',num2str(40*k)))
        xlabel('Reactivos absorbidos [MVar]')
        h2 = legend(H1,'Paposo220', 'Maitencillo220','Location','best');
        h2 = legend(H2,'Reactivos SVC','Location','best');
        fi=fopen(strcat('CardonesI2_a1=',num2str(a1) ,'_a2=',num2str(a2) ,'_a3=',num2str(40*k) ,'.txt'),'wt')
        for i=1:1:16
            fprintf(fi,'%d',Q(i))
```



```

    fprintf(fi, '%s', ' ')
    for j=1:1:4
        fprintf(fi, '%F', y2(i,j,k))
        fprintf(fi, '%s', ' ')
    end
    fprintf(fi, '\n')
end
fclose(fi)
else
figure(3)
subplot(2,2,k-8)
[grafico,H1,H2]=plotyy(Q,y2(1:16,1:2,k),Q,y2(1:16,4,k),'plot')
set(grafico,'XLim',[0 110])
set(grafico(1),'YLim',[1 1.05])
set(grafico(2),'YLim',[0 2.5]) set(H2,'LineStyle','x') set(H1(1,:), 'Marker','o')
set(H1(2,:), 'Marker','s')
set(get(grafico(1),'Ylabel'),'String','Tensiones [pu]')
set(get(grafico(2),'Ylabel'),'String','Reactivos SVC [pu]')
title(strcat('a1=',num2str(a1) , ' a2=',num2str(a2), ' b1=',num2str(40*k)))
xlabel('Reactivos absorbidos [MVar]')
h2 = legend(H1,'Paposo220', 'Maitencillo220','Location','best');
h2 = legend(H2,'Reactivos SVC','Location','best');
fi=fopen(strcat('Cardones12_a1=',num2str(a1) , '_a2=',num2str(a2), '_a3=',num2str(40*k), '.txt'), 'wt')
for i=1:1:16
    fprintf(fi, '%d',Q(i))
    fprintf(fi, '%s', ' ')
    for j=1:1:4
        fprintf(fi, '%F', y2(i,j,k))
        fprintf(fi, '%s', ' ')
    end
    fprintf(fi, '\n')
end
fclose(fi)
end
end
figure(4)
subplot(2,2,1)
[grafico,H1,H2]=plotyy(Q,y2(1:16,1:2,1),Q,y2(1:16,4,1),'plot')
set(grafico,'XLim',[0 110])
set(grafico(1),'YLim',[1 1.05])
set(grafico(2),'YLim',[0 2.5])
set(H2,'LineStyle','x')
set(get(grafico(1),'Ylabel'),'String','Tensiones [pu]')
set(get(grafico(2),'Ylabel'),'String','Reactivos SVC [pu]')
title(strcat('a1=',num2str(a1) , ' a2=',num2str(a2), ' b1=',num2str(1*40)))
xlabel('Reactivos absorbidos [MVar]')
h2 = legend(H1,'Paposo220', 'Maitencillo220','Location','best');
h2 = legend(H2,'Reactivos SVC','Location','best');
subplot(2,2,2)
[grafico,H1,H2]=plotyy(Q,y2(1:16,1:2,4),Q,y2(1:16,4,4),'plot')
set(grafico,'XLim',[0 110])
set(grafico(1),'YLim',[1 1.05])
set(grafico(2),'YLim',[0 2.5])
set(H2,'LineStyle','x')
set(get(grafico(1),'Ylabel'),'String','Tensiones [pu]')
set(get(grafico(2),'Ylabel'),'String','Reactivos SVC [pu]')
title(strcat('a1=',num2str(a1) , ' a2=',num2str(a2), ' b1=',num2str(4*40)))
xlabel('Reactivos absorbidos [MVar]')
h2 = legend(H1,'Paposo220', 'Maitencillo220','Location','best');
h2 = legend(H2,'Reactivos SVC','Location','best');
subplot(2,2,3)
[grafico,H1,H2]=plotyy(Q,y2(1:16,1:2,8),Q,y2(1:16,4,8),'plot')
set(grafico,'XLim',[0 110]) set(grafico(1),'YLim',[1 1.05])
set(grafico(2),'YLim',[0 2.5])
set(H2,'LineStyle','x')
set(get(grafico(1),'Ylabel'),'String','Tensiones [pu]')
set(get(grafico(2),'Ylabel'),'String','Reactivos SVC [pu]')
title(strcat('a1=',num2str(a1) , ' a2=',num2str(a2), ' b1=',num2str(8*40)))
xlabel('Reactivos absorbidos [MVar]')
h2 = legend(H1,'Paposo220', 'Maitencillo220','Location','best');
h2 = legend(H2,'Reactivos SVC','Location','best');
subplot(2,2,4)
[grafico,H1,H2]=plotyy(Q,y2(1:16,1:2,12),Q,y2(1:16,4,12),'plot')
set(grafico,'XLim',[0 110])
set(grafico(1),'YLim',[1 1.05])set(grafico(2),'YLim',[0 2.5])set(H2,'LineStyle','x')
set(get(grafico(1),'Ylabel'),'String','Tensiones [pu]')
set(get(grafico(2),'Ylabel'),'String','Reactivos SVC [pu]')
title(strcat('a1=',num2str(a1) , ' a2=',num2str(a2), ' b1=',num2str(12*40)))
xlabel('Reactivos absorbidos [MVar]')
h2 = legend(H1,'Paposo220', 'Maitencillo220','Location','best');
h2 = legend(H2,'Reactivos SVC','Location','best');

```