

Trabajo Fin de Máster
Máster en Sistemas de Energía Eléctrica

"Conservation Voltage Reduction": Revisión del
estado del arte

Autor: Juan Francisco Moscoso Romo

Tutores: Esther Romero Ramos, Alejandro Marano Marcolini

Dpto. Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Máster
Máster en Sistemas de Energía Eléctrica

"Conservation Voltage Reduction": Revisión del estado del arte

Autor:

Juan Francisco Moscoso Romo

Tutores:

Esther Romero Ramos

Catedrática de Universidad

Alejandro Marano Marcolini

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023

Trabajo Fin de Máster: "Conservation Voltage Reduction": Revisión del estado del arte

Autor: Juan Francisco Moscoso Romo

Tutores: Esther Romero Ramos, Alejandro Marano Marcolini

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal

A mis padres, Freddy y Deisi, por ser mi ejemplo y brindarme su apoyo incondicional.

A mi hermana, María Paz, por proporcionarme soporte y ayuda en todo momento.

A mi hermano, Freddy Andrés, a quien le dedico especialmente este trabajo. Suco tengo la certeza que estás en un mejor lugar y sé que eres feliz, libre y que me acompañas en todo momento. Un abrazo hacia el cielo querido hermano y por siempre anillos especiales.

Agradecimientos

A la ciudad de Sevilla, por abrirme sus puertas durante todo mi periodo de estudios.

A mis padres y hermanos, por su cariño y su apoyo incondicional en mi decisión de venir a España a cumplir este sueño.

A todos mis familiares y amigos, por estar siempre pendientes de mí y ayudarme en todo lo que necesitaba.

A todos los amigos que hice acá en Sevilla, por pasar tantos buenos momentos juntos.

A Esther y Alejandro, por guiarme a lo largo del proceso del Trabajo de Fin de Máster.

A la Universidad de Sevilla y a sus profesores, por brindarme una excelente formación.

Juan Francisco Moscoso Romo

Sevilla, 2023

Resumen

En el presente trabajo se realiza una revisión exhaustiva del estado del arte acerca de la temática de ahorro energético por reducción de tensión, conocida también como CVR (del inglés Conservation Voltage Reduction). El análisis de la literatura se inicia con una presentación de los fundamentos teóricos relacionados con la técnica de CVR, que engloba información esencial sobre el tema. Se aborda tanto las aplicaciones como los métodos de evaluación y los métodos para cuantificar los efectos de la técnica de CVR en sistemas eléctricos convencionales y modernos, resaltando su importancia en los sistemas de distribución. Asimismo, se examina la relación entre la técnica de CVR y la generación distribuida. Además, se ofrece un resumen de los resultados de ocho casos de estudio prácticos en los que la técnica de CVR se ha implementado con éxito. Finalmente, se presenta las conclusiones y recomendaciones derivadas de este estudio.

Abstract

In this work, a comprehensive review of the state of the art is conducted on the topic of energy savings through voltage reduction, also known as CVR (Conservation Voltage Reduction). The analysis of the literature begins with a presentation of the theoretical foundations related to the CVR technique, which encompasses essential information on the topic. Both the applications and the evaluation methods and techniques to quantify the effects of the CVR technique in conventional and modern electrical systems are addressed, highlighting its importance in distribution systems. Likewise, the relationship between the CVR technique and distributed generation is examined. Additionally, a summary of the results of eight practical case studies in which CVR technique has been successfully implemented is provided. Finally, the conclusions and recommendations derived from this study are presented.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
Acrónimos	xxi
1 Generalidades	1
1.1 <i>Introducción</i>	1
1.2 <i>Objetivos</i>	2
1.2.1 <i>Objetivo General</i>	2
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	2
1.3 <i>Metodología</i>	2
1.4 <i>Contenido</i>	2
2 Fundamentos Básicos CVR	5
2.1 <i>Definición Ahorro Energético por Reducción de Tensión (CVR)</i>	5
2.2 <i>Evolución y Estado Actual de la técnica de CVR</i>	7
2.3 <i>Modelado de Carga</i>	8
2.3.1 <i>Cargas sin ciclos térmicos</i>	8
2.3.2 <i>Cargas con ciclos térmicos</i>	14
2.4 <i>Factor CVR</i>	15
2.5 <i>Estrategias de uso de la técnica de CVR</i>	19
2.6 <i>Métodos de evaluación de los efectos de la técnica de CVR</i>	20
2.6.1 <i>Métodos basados en Comparación</i>	21
2.6.2 <i>Métodos basados en regresión</i>	22
2.6.3 <i>Métodos Basados en Simulación</i>	25
2.6.4 <i>Métodos basados en síntesis</i>	26
2.6.5 <i>Métodos basados en datos</i>	28
2.6.6 <i>Datos requeridos para la evaluación del ahorro energético</i>	30
2.7 <i>Implementación y Rentabilidad de la técnica de CVR</i>	30

2.7.1	Dispositivos de bucle abierto para regular la tensión	31
2.7.2	VVC de bucle cerrado	33
2.7.3	Rentabilidad	34
2.8	<i>Beneficios CVR</i>	34
3	CVR en Sistemas Eléctricos Modernos	35
3.1	<i>Aplicaciones CVR en sistemas eléctricos modernos</i>	35
3.1.1	Ahorro Energético y Disminución de la demanda pico	36
3.1.2	Soporte de frecuencia y síntesis de inercia.	37
3.2	<i>Técnicas de implementación CVR en sistemas eléctricos modernos</i>	38
3.2.1	Implementación de CVR en redes modernas basadas en PE con MG conectadas a la red	40
3.2.2	Implementación de la técnica de CVR en redes modernas basadas en PE con MG aisladas	43
3.3	<i>Evaluación de los efectos de la técnica de CVR en sistemas eléctricos modernos</i>	46
3.3.1	Métodos de evaluación de los efectos CVR – Aplicaciones a corto plazo	47
3.4	<i>Tendencias Futuras de la técnica de CVR</i>	49
3.4.1	Tendencias futuras de las aplicaciones de la técnica de CVR	49
3.4.2	Tendencias futuras de las técnicas de implementación de la técnica de CVR	50
3.4.3	Tendencias futuras de los métodos de evaluación de la técnica de CVR	50
4	Casos de Estudio CVR	51
4.1	<i>Casos de Estudio – Estados Unidos</i>	51
4.1.1	Caso de Estudio 1 – ENERGÍA ELÉCTRICA AMERICANA (AEP)	51
4.1.2	Caso de Estudio 2 - DISTRITO DE SERVICIOS PÚBLICOS DEL PUEBLO DE CENTRAL LINCOLN (EMPRESA DE SERVICIOS ELÉCTRICOS DE OREGÓN)	51
4.1.3	Caso de Estudio 3 – COMPAÑÍA DE ENERGÍA DE IDAHO (IPC)	52
4.1.4	Caso de Estudio 4 – COMPAÑÍA DE ENERGÍA WEST PENN	52
4.1.5	Caso de Estudio 5 – COMPAÑÍA ELÉCTRICA DE FILADELFIA (PECO)	53
4.1.6	Caso de Estudio 6 – DUKE ENERGY OHIO	53
4.1.7	Caso de Estudio 7 – SOUTHERN CALIFORNIA EDISON	53
4.1.8	Caso de Estudio 8 – ALIANZA PARA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL NOROESTE (NEEA)	53
4.2	<i>Caso de Estudio – Canadá</i>	54
5	Conclusiones y Recomendaciones	57
5.1	<i>Conclusiones</i>	57
5.2	<i>Recomendaciones</i>	58
	Referencias	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2–1. Coeficientes del modelo ZIP para diferentes cargas residenciales.	11
Tabla 2–2 Factores CVR de diferentes referencias [3].	16
Tabla 2–3 Factor CVR para diferentes tipos de clientes [4].	27
Tabla 4–1. Factor CVR y Ahorro Energético del Distrito de servicios públicos del pueblo de Central Lincoln [39].	52
Tabla 4–2. Factores CVR – IPC	52
Tabla 4–3. Factores CVR – Compañía de energía West Penn	53
Tabla 4–4. Factores CVR – NEEA	54
Tabla 4–5. Valores promedios de reducción de tensión [40].	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Ilustración de la implementación de la técnica de CVR en una curva de demanda diaria [8].	6
Figura 2-2. Rangos de tensión según la norma ANSI C84.1 [10].	6
Figura 2-3. Regulación tradicional (color negro) vs CVR (color gris) [11].	7
Figura 2-4. Modelo de carga ZIP [3].	9
Figura 2-5. Relación entre la tensión de alimentación y la potencia de la carga utilizando el modelo ZIP [15].	11
Figura 2-6. Relación entre la tensión de alimentación y la corriente demandada de la carga utilizando el modelo ZIP [15].	11
Figura 2-7. Efectos de la variación de la tensión en la potencia activa y reactiva de una bombilla incandescente de 70W [12].	12
Figura 2-8. Efectos de la variación de la tensión en la potencia activa y reactiva de una televisión (tubo de rayos catódicos) [12].	12
Figura 2-9. Efectos de la variación de la tensión en la potencia activa y reactiva de un ventilador oscilante [12].	12
Figura 2-10. Efectos de la variación de la tensión en la potencia activa y reactiva de un LCD – Dell [12].	13
Figura 2-11. Efectos de la variación de la tensión en la potencia activa y reactiva de una televisión de plasma [12].	13
Figura 2-12. Efectos de la variación de la tensión en la potencia activa y reactiva de un LCD – Clarity TV [12].	13
Figura 2-13. Efectos de la variación de la tensión en la potencia activa y reactiva de una luz fluorescente compacta (CFL) 13W [12].	14
Figura 2-14. Efectos de la variación de la tensión en la potencia activa y reactiva de una luz fluorescente compacta (CFL) 20W [12].	14
Figura 2-15. Efectos de la variación de la tensión en la potencia activa y reactiva de una luz fluorescente compacta (CFL) 42W [12].	14
Figura 2-16. Modelo ETP empleado en un sistema HVAC residencial [12]	15
Figura 2-17. Valores del factor $CVR_{f(kWh)}$ de diferentes referencias.	18
Figura 2-18. Factor $CVR_{f(kW)}$ a lo largo del día en cada una de las cuatro estaciones [18].	19
Figura 2-19. a) Reducción de la demanda a corto plazo y b) Reducción de la energía a largo plazo [20].	20

Figura 2-20. Métodos basados en comparación [9].	21
Figura 2-21. Explicación gráfica del enfoque DID [9].	25
Figura 2-22. Diagrama de flujo de los métodos basados en simulación [9].	26
Figura 2-23. Estructura del modelo SVM para evaluar los efectos de la técnica de CVR [7].	29
Figura 2-24. OLTC [22].	31
Figura 2-25. Regulador de Tensión que incluye el LDC [23].	32
Figura 2-26. Banco de Capacitores en una red de distribución [25].	33
Figura 3-1. Clasificación de las aplicaciones de la técnica de CVR en sistemas eléctricos modernos según escalas de tiempo [7].	36
Figura 3-2. Soporte de frecuencia y síntesis de inercia a través de la técnica de CVR [7].	38
Figura 3-3. Clasificación de los métodos de implementación de CVR en redes modernas basadas en PE. 40	
Figura 3-4. Curvas volt/var y volt/watt de los inversores inteligentes [7].	41
Figura 3-5. Inversor inteligente que integra el control volt/var y la técnica de CVR [7].	41
Figura 3-6. a) SLQ. b) SLES. c) SLBC [35].	43
Figura 3-7. Curvas droop convencionales. (a) Curva P-f. (b) Curva Q-V [7].	44
Figura 3-8. Curvas droop convencionales durante condiciones normales y de sobrecarga [7].	45
Figura 3-9. Clasificación de los métodos de cuantificación de la técnica de CVR.	47
Figura 3-10. Señales de perturbación empleadas en las técnicas basadas en perturbaciones [7].	48
Figura 4-1. Factor CVR obtenidos para cada estación del año [40].	56
Figura 4-2. Factor CVR promedio anual de cada subestación [40].	56

Acrónimos

AMI	Infraestructura de medición avanzada
ANSI	Instituto nacional estadounidense de estándares
BESS	Sistemas de almacenamiento de energía en baterías
CVR	Conservation voltage reduction
DER	Recursos energéticos distribuidos
DSM	Gestión del lado de la demanda
HVAC	Sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado
HVR	Reducción de tensión a nivel doméstico
IIDG	Generación distribuida con interfaz de inversor
LDC	Compensador de caída de línea
MG	Microrred
OLTC	Cambiador de tomas bajo carga
PE	Electrónica de Potencia
RES	Fuentes de energía renovable
SCADA	Supervisión, control y adquisición de datos
SL	Carga inteligente
VSR	Reducción de dispersión de tensión
VVC	Control volt/var
VVO	Optimización volt/var

1 GENERALIDADES

En este capítulo se presenta las generalidades acerca de la temática de ahorro energético por reducción de tensión (CVR, del inglés Conservation Voltage Reduction). La introducción, los objetivos del trabajo, la metodología seguida y el contenido del trabajo se describe a continuación.

1.1 Introducción

El propósito fundamental de la generación eléctrica es satisfacer la creciente demanda de energía de los usuarios finales. El crecimiento constante de la población, la demanda energética en constante alza, el aumento de los costos de electricidad y los avances tecnológicos en redes inteligentes han llevado a las empresas suministradoras de electricidad a buscar medidas eficaces para reducir el consumo de energía y la potencia demandada por los clientes [1]. Además, al hablar específicamente del sistema de distribución, los niveles de tensión de la red tienen que estar dentro de un rango aceptable, de tal manera que los equipos que se conecten a la red no presenten ningún inconveniente [2].

Justamente dentro de este ámbito se encuentra el ahorro energético por reducción de tensión, también conocido como CVR. La técnica de CVR es una técnica adoptada por las empresas de servicio eléctrico que consiste en reducir la tensión de la red en los sistemas de distribución con el propósito de lograr un ahorro energético y reducir la potencia demandada por los usuarios, manteniendo siempre el perfil de tensión dentro de los valores tolerables [3]. Esta técnica no es una estrategia nueva, ya que se obtuvieron resultados significativos en las décadas de 1980 y 1990 en términos de reducción de energía y demanda pico [4]. Sin embargo, existen ciertas limitaciones inherentes a la aplicación de esta estrategia de ahorro de energía. La eficacia de la técnica de CVR y los resultados obtenidos dependen de las características propias de la carga, específicamente, de como esta se comporta ante los cambios de la tensión. Algunas cargas consumen más energía cuando se reduce la tensión de alimentación, mientras que otras consumen menos. Idealmente, para optimizar los resultados de la técnica de CVR, todas las cargas deberían reducir su consumo al disminuir los niveles de tensión, pero esto no es el caso. Por lo tanto, los resultados que se obtengan están intrínsecamente relacionados con el comportamiento de las cargas en respuesta a las variaciones de tensión [5].

Las aplicaciones convencionales de la técnica de CVR se centran en lograr un ahorro de energía en la red o reducir el consumo de electricidad en las horas de mayor demanda, no obstante, en la actualidad también se está investigando su utilidad práctica en las redes eléctricas modernas, especialmente en lo que respecta al soporte de frecuencia y la síntesis de inercia en los sistemas. Además, la incorporación de la técnica de CVR

en la red eléctrica ofrece beneficios adicionales, como la reducción de pérdidas de energía en transformadores y líneas de transmisión, mejoras en el factor de potencia, disminución de los costos energéticos y una contribución a la reducción del calentamiento global mediante la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la reducción del consumo de combustibles [6]. En cuanto a los métodos de implementación de la técnica de CVR en los sistemas eléctricos, estos pueden realizarse utilizando una gran variedad de equipos, como por ejemplo capacitores, cambiadores de tomas bajo carga (OLTC, del inglés On-Load Tap Changer), compensadores de caída de línea (LDC, del inglés Line Drop Compensators), inversores inteligentes, cargas inteligentes, entre otros [4][7]. De igual manera, un tema que resulta de vital importancia es evaluar los efectos que conlleva la implementación de esta técnica en los sistemas. Esto representa un gran desafío debido a que existe una gran cantidad de factores que influyen en los resultados obtenidos. Además, los métodos de evaluación tienen que seleccionarse en función de la aplicación a la que se destina la técnica de CVR.

De esta manera, la técnica de CVR se presenta como una estrategia esencial en el ámbito de la distribución eléctrica para abordar los desafíos actuales de la eficiencia energética, la reducción de costos y el impacto ambiental.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Realizar una revisión exhaustiva del estado del arte en relación al tema “Conservation Voltage Reduction” con el propósito de proporcionar una visión integral y actualizada de los aspectos teóricos, técnicos y prácticos de esta estrategia de gestión de energía eléctrica.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Exponer de manera detallada los conceptos y principios teóricos fundamentales de la técnica de CVR.
- Determinar el estado actual de la técnica de CVR en las redes eléctricas modernas.
- Analizar casos de estudio relevantes de implementación exitosa de la técnica de CVR, con énfasis en los resultados obtenidos.

1.3 Metodología

La metodología empleada para llevar a cabo este trabajo se dividió en varios pasos claramente definidos. En primer lugar, se realizó una búsqueda exhaustiva de información relevante sobre la temática de ahorro energético por reducción de tensión (CVR) en diversas fuentes, lo que permitió obtener una comprensión sólida del tema de estudio. A continuación, se procedió a la selección de las fuentes de información más destacadas y se organizó la información por temas siguiendo el índice propuesto para estructurar el trabajo.

Una vez se contó con una base sólida de fuentes bibliográficas seleccionadas, se llevó a cabo un análisis crítico de la información, identificando las ideas y hallazgos más relevantes. Luego, se procedió a la síntesis de la información, donde se destacó similitudes, diferencias y patrones emergentes en la literatura.

Con la información sintetizada y organizada, se procedió a la redacción del trabajo, asegurando que la estructura y la presentación fueran coherentes. Finalmente, después de una revisión minuciosa del manuscrito, se redactó las conclusiones y recomendaciones basadas en el análisis crítico y la síntesis de la literatura revisada.

1.4 Contenido

El contenido del trabajo está organizado de la siguiente manera:

- **Capítulo 1:** En este capítulo se proporciona una introducción sobre la técnica de CVR, se define los

objetivos de la investigación y se describe la metodología utilizada para la realización del trabajo.

- **Capítulo 2:** En este capítulo se presenta los fundamentos teóricos acerca de la técnica de CVR.
- **Capítulo 3:** En este capítulo se analiza el estado actual de la técnica de CVR en los sistemas eléctricos modernos.
- **Capítulo 4:** En este capítulo se presenta un resumen de varios casos de estudio en donde la técnica de CVR se ha implementado de manera exitosa.
- **Capítulo 5:** En este capítulo se expone las conclusiones derivadas del análisis y revisión de la literatura, y se ofrece recomendaciones basadas en los hallazgos de la investigación.

2 FUNDAMENTOS BÁSICOS CVR

En este capítulo se exponen los principios esenciales relacionados con la técnica de CVR.

2.1 Definición Ahorro Energético por Reducción de Tensión (CVR)

El ahorro energético por reducción de tensión, también conocido como CVR, hace referencia a la práctica de reducir la tensión en las redes de distribución a niveles óptimos y seguros para el funcionamiento de los equipos conectados a la red, buscando con ello una reducción del consumo energético, lo que la convierte en uno de los métodos más rentables para ahorrar energía. De esta manera, al disminuir el nivel de tensión de manera controlada, se puede reducir el consumo de energía por parte de los consumidores, cuya potencia efectivamente disminuye al suministrarles tensiones más bajas, las pérdidas de energía en la red y la demanda en las horas pico, lo que conlleva a una mayor eficiencia energética [3][4].

En la Figura 2-1 se ilustra el ahorro energético y la disminución de la demanda pico por medio de la implementación de la técnica de CVR en una curva de demanda diaria. De esta manera, la demanda del consumidor disminuye, pasando de la curva con línea sólida a la curva con línea punteada. Al pasar a la curva inferior, se evidencia la disminución de la potencia pico que demanda la carga y el ahorro energético producido (área entre las dos curvas). Es fundamental destacar que, para que la técnica de CVR funcione de manera efectiva, se requiere cargas que reduzcan su demanda de energía al disminuir su tensión de alimentación.

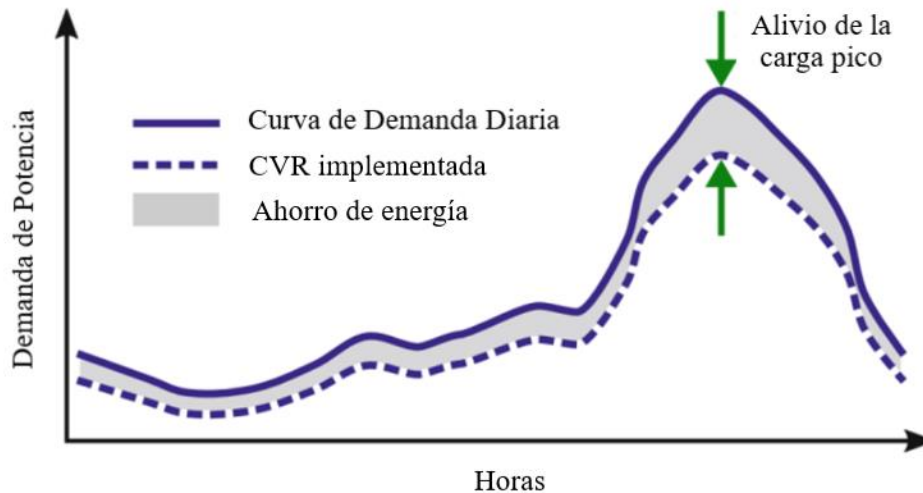


Figura 2-1. Ilustración de la implementación de la técnica de CVR en una curva de demanda diaria [8].

Existe cierta flexibilidad en cuanto al nivel de tensión que suministran las empresas distribuidoras de electricidad de acuerdo con la normativa aplicable. A modo de ejemplo, de acuerdo al estándar ANSI C84.1, los equipos de los clientes conectados a la red eléctrica, en condiciones normales de funcionamiento, deben tener un valor de tensión en terminales dentro del $\pm 5\%$ de su valor nominal [3]. Así, en una red eléctrica cuya tensión nominal es de 120 V, la banda de tensión aceptable va desde los 114 V hasta los 126 V, como se aprecia en la Figura 2-2. La posibilidad de que los equipos conectados a la red eléctrica puedan operar en la banda inferior de tensión sin tener ningún inconveniente es el pilar fundamental en la técnica de CVR (en el caso de la red de 120 V, la banda inferior va desde los 114 V hasta los 120 V), puesto que existen equipos eléctricos que consumen menos energía al reducir su tensión de alimentación [9]. Sin embargo, como se explica más adelante, la mayoría de los alimentadores de la red de distribución operan en el rango superior de tensión. En la Figura 2-3 se muestra una comparación en un alimentador usando la regulación tradicional y la técnica de CVR, en donde se observa claramente como con la aplicación de la técnica de CVR la tensión es menor pero siempre manteniéndose dentro de los límites de operación.

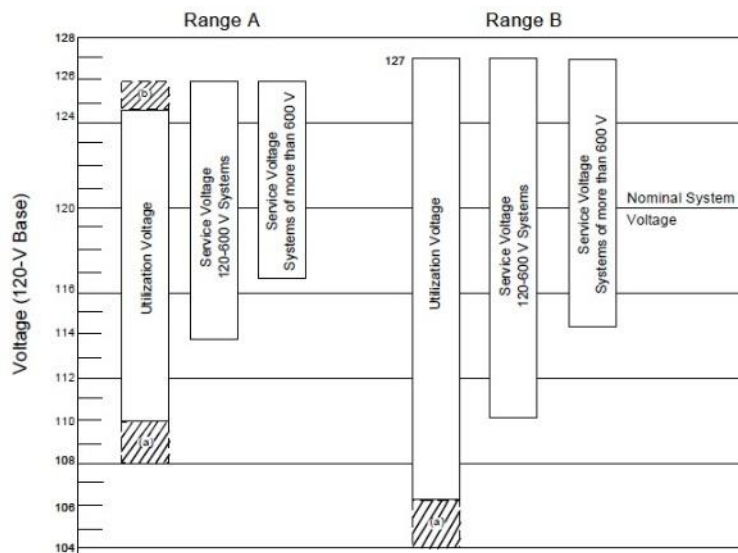


Figura 2-2. Rangos de tensión según la norma ANSI C84.1 [10].

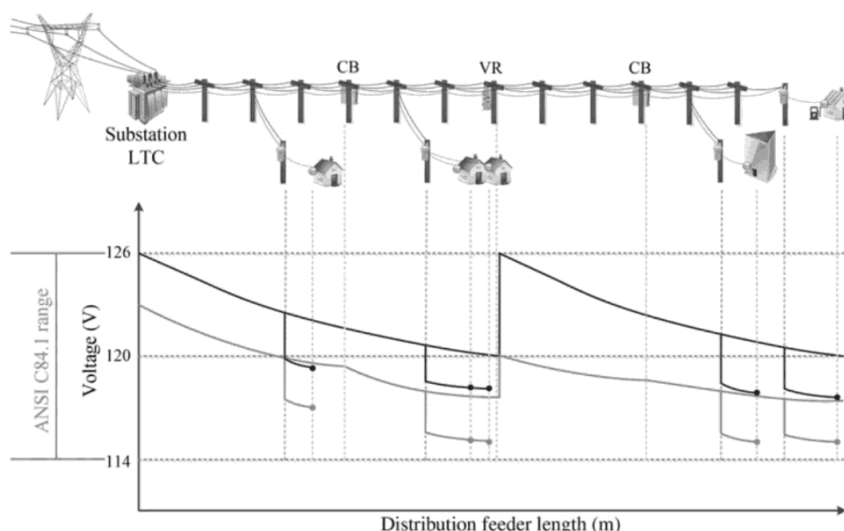


Figura 2-3. Regulación tradicional (color negro) vs CVR (color gris) [11].

2.2 Evolución y Estado Actual de la técnica de CVR

El uso de la técnica de CVR para reducir la energía en el lado de los consumidores no es un concepto reciente. Se ha tenido conocimiento de esta práctica desde el inicio del uso comercial de la electricidad [3]. Existen diversas investigaciones realizadas en diversos países que muestran los efectos de la técnica de CVR en el consumo de energía y en la reducción de la demanda de las horas pico. En el pasado, en Estados Unidos diversos estudios demostraron que se alcanzaba una reducción de la carga de los consumidores del 0.3%-1% por cada 1% de reducción de la tensión de alimentación. Además, en los últimos años un estudio realizado por el Laboratorio Nacional del Noroeste del Pacífico ha concluido que se podría tener una reducción del 3.04% de la energía total anual consumida en los Estados Unidos si se empleara la técnica de CVR en todos los alimentadores de la red de distribución en dicho país. Otros estudios también se han realizado en otros países para mostrar los efectos de la técnica de CVR. Así, una investigación realizada en Australia concluyó que con una reducción del 2.5% de la tensión se podría obtener un ahorro del 1% en el consumo de energía en las redes de distribución de clientes residenciales. Otro estudio realizado en Irlanda concluyó que con la aplicación de la técnica de CVR se podría alcanzar ahorros energéticos del 1.7% [4].

A pesar de los múltiples beneficios que los estudios muestran en la aplicación de la técnica de CVR, una práctica extendida a lo largo del mundo ha sido operar la tensión de la red eléctrica en la banda superior de su rango permitido [3][4]. Esto debido a la creencia de contar en la red de distribución únicamente con cargas de potencia constante, por lo cual al operar a niveles superiores de tensión se espera que la corriente sea menor. Sin embargo, lo anterior no es verdadero, ya que existen diferentes tipos de carga en la red de distribución a más de las cargas de potencia constante. Conceptualmente hablando, no existe mayor dificultad en la aplicación de la técnica de CVR, ya que, al reducir la tensión de la red se busca una reducción de la energía demandada por los consumidores. Sin embargo, para una implementación efectiva de la técnica de CVR es necesario contar con la información adecuada como, por ejemplo, las características del alimentador (tamaño, reguladores de tensión, bancos de condensadores, etc.), la composición de la carga de dicho alimentador y la presencia de fuentes de energía distribuida [3]. Debido a dicha información necesaria, surgen inconvenientes a la hora de la implementación de la técnica de CVR en las redes de distribución, siendo el principal problema el diferente comportamiento que presentan las cargas ante la variación de la tensión de alimentación. Otro inconveniente está relacionado al desconocimiento existente de las variaciones de la carga de los alimentadores en la red a lo largo del día. Además, para la puesta en marcha de la técnica de CVR se requiere una coordinación adecuada de los elementos de control de tensión/ potencia reactiva y que estos sean capaces de operar junto a la presencia de generación distribuida y con los sistemas de monitoreo y control de las redes de distribución [8]. Se puede agrupar todas las barreras técnicas antes mencionadas para la correcta implementación de la técnica de CVR en tres grupos [4]:

- 1) Coordinación adecuada entre los diferentes dispositivos que controlan la tensión y la potencia reactiva para reducir la tensión de la red eléctrica de manera confiable y óptima.

- 2) Evaluación y verificación eficiente de los efectos de la implementación de la técnica de CVR.
- 3) Coordinación entre la técnica de CVR y la generación distribuida.

En la actualidad, diversos temas como la sostenibilidad, el calentamiento global, las emisiones de gases de efecto invernadero, los requisitos para la reducción del carbono, el aumento en el costo del uso de la electricidad, temas políticos, entre otros, han provocado una gran atención e interés mundial en cuanto a la conservación o reducción del consumo de la energía y a la eficiencia energética, por lo cual los temas relacionados a la técnica de CVR se analizan como parte integral de las soluciones energéticas mundiales [3].

2.3 Modelado de Carga

No todos los equipos eléctricos conectados a la red se comportan de la misma manera al variar su tensión de alimentación. Como se mencionó anteriormente, existen cargas que disminuyen su consumo de potencia y energía al reducir la tensión en la red eléctrica, siendo generalmente esta disminución del 2% al 3% de la tensión nominal del sistema. No obstante, la tensión siempre debe mantenerse dentro de los límites establecidos por la norma ANSI. La presencia de estas cargas hace posible la utilización de la técnica de CVR. Sin embargo, en la realidad, las cargas de los clientes son de diferentes tipos (iluminación, sistemas de calefacción y enfriamiento, equipos electrónicos, electrodomésticos, etc.) y no siempre siguen dicho comportamiento ya que, ante variaciones de tensión, pueden comportarse de maneras muy diferentes [3]. Sumado a esto, existe dificultad para evaluar con precisión los ahorros de energía mediante el uso de la técnica de CVR debido a las variaciones en la carga a lo largo del día y al hecho de que en la mayoría de los alimentadores de la red de distribución no se conoce la composición de la carga. Además, dicha composición de la carga y los efectos de reducir la tensión varían dependiendo del tipo de cliente (residencial, comercial e industrial) [7]. Por todo lo antes mencionado, es preciso contar con un modelado de carga para las diferentes aplicaciones que sea lo más preciso posible. Lo anterior ha sido un tema de investigación y discusión en el ámbito de la ingeniería eléctrica por muchos años. Así, los modelos de las cargas pueden clasificarse dentro de dos grupos: modelos sin ciclos térmicos y modelos con ciclos térmicos. En el primer grupo se encuentran modeladas las cargas cuyo consumo de energía es igual todo el tiempo que estén conectadas a la alimentación, con excepción de los cambios en el consumo ocasionados por variaciones en la tensión. Estas cargas no poseen ningún sistema de retroalimentación de control, por lo cual estas se denominan también dispositivos de circuito abierto. Una bombilla de luz es un ejemplo de este tipo de cargas, ya que cuando esta encendida consume energía, dependiendo de la tensión, de manera constante. En el segundo grupo se encuentran las cargas con ciclos térmicos las cuales, dependiendo de la tensión de alimentación, varían su ciclo de trabajo. Estas cargas también se denominan como dispositivos de circuito cerrado. Dentro de este grupo se encuentran los sistemas de calefacción y los sistemas de aire acondicionado. A manera de ejemplo, si se reduce la tensión de alimentación en un calentador de agua, este consumirá menos energía de manera instantánea, sin embargo, necesitará una mayor cantidad de tiempo para calentar la misma cantidad de agua [12]. A continuación, se describe de manera más detallada los dos modelos antes mencionados.

2.3.1 Cargas sin ciclos térmicos

Un modelo ampliamente aceptado para modelar las cargas sin ciclos térmicos es el denominado modelo ZIP, el cual es un modelo exponencial que emplea cargas invariantes en el tiempo de impedancia constante (Z), de corriente constante (I) y de potencia constante (P). Este modelo es ampliamente reconocido como la mejor manera de representar las cargas [3]. Este modelo se puede adaptar para tener en cuenta las respuestas variables en el tiempo de la carga, ya sea debido al comportamiento de los clientes, factores climáticos y al encendido/apagado de los dispositivos eléctricos; por lo cual es preciso para su utilización en la técnica de CVR [1][7]. En la literatura existen varias estrategias propuestas para el modelado de carga basadas en el modelo ZIP [7]. En la Figura 2-4 se muestra el modelo convencional ZIP.

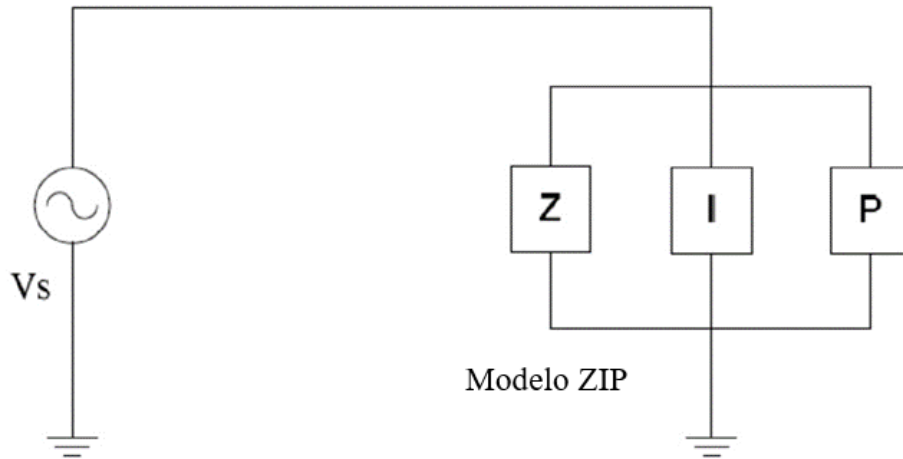


Figura 2-4. Modelo de carga ZIP [3].

En [13] se muestran las características de los modelos de carga antes mencionados de manera individual, así como también del modelo ZIP, los cuales se detallan a continuación:

2.3.1.1 Cargas de Impedancia Constante (Z)

En las cargas de impedancia constante, la potencia absorbida es proporcional al cuadrado de la tensión. Al disminuir el valor de la tensión, se tiene una corriente proporcionalmente menor. La ecuación (2-1) describe esta relación.

$$P_L = P_0 \cdot \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 \quad (2-1)$$

Donde:

- P_L : Potencia activa de la carga cuando está alimentada a la tensión V .
- P_0 : Potencia activa nominal de la carga.
- V : Tensión de alimentación de la carga.
- V_0 : Tensión nominal de la carga.

2.3.1.2 Cargas de Corriente Constante (I)

En las cargas de corriente constante, la potencia absorbida por la carga es directamente proporcional al valor de la tensión (relación lineal). En este caso, como su nombre lo indica, la corriente permanece constante independiente del valor de la tensión. La ecuación (2-2) describe esta relación.

$$P_L = P_0 \cdot \left(\frac{V}{V_0}\right) \quad (2-2)$$

2.3.1.3 Cargas de Potencia Constante (P)

En las cargas de potencia constante, la potencia absorbida por la carga no depende del valor de la tensión de alimentación. De esta manera, al disminuir la tensión de alimentación, la corriente se incrementa para mantener constante el valor de potencia. La ecuación (2-3) describe esta relación.

$$P_L = P_0 \quad (2-3)$$

2.3.1.4 Modelo ZIP

Este modelo muestra una relación polinomial entre la potencia de la carga y la tensión de alimentación, siendo dicha relación una combinación lineal de los tres modelos de carga antes descritos (impedancia constante, corriente constante y potencia constante). A continuación, se muestra las ecuaciones del modelo ZIP.

$$P_L = P_0 \cdot \left[\alpha_{1,p} \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + \alpha_{2,p} \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right) + \alpha_{3,p} \right] \quad (2-4)$$

$$\alpha_{1,p} + \alpha_{2,p} + \alpha_{3,p} = 1 \quad (2-5)$$

Donde:

- $\alpha_{1,p}$: Coeficiente de impedancia constante de la potencia activa.
- $\alpha_{2,p}$: Coeficiente de corriente constante de la potencia activa.
- $\alpha_{3,p}$: Coeficiente de potencia constante de la potencia activa.

Realizando un análisis similar al anterior, se tiene el modelo ZIP empleado para la potencia reactiva.

$$Q_L = Q_0 \cdot \left[\alpha_{1,q} \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + \alpha_{2,q} \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right) + \alpha_{3,q} \right] \quad (2-6)$$

$$\alpha_{1,q} + \alpha_{2,q} + \alpha_{3,q} = 1 \quad (2-7)$$

Donde:

- Q_L : Potencia reactiva de la carga cuando está alimentada a la tensión V .
- Q_0 : Potencia reactiva nominal de la carga.
- $\alpha_{1,q}$: Coeficiente de impedancia constante de la potencia reactiva.
- $\alpha_{2,q}$: Coeficiente de corriente constante de la potencia reactiva.
- $\alpha_{3,q}$: Coeficiente de potencia constante de la potencia reactiva.

De esta manera cada carga o dispositivo del sistema tiene su propia relación potencia activa – tensión $P-V$ y potencia reactiva – tensión $Q-V$, la cual puede representarse por medio del modelo ZIP. Para determinar los coeficientes del modelo, se emplea un ajuste de mínimos cuadrados a los datos obtenidos mediante pruebas de laboratorio. Para determinar las relaciones $P-V$ y $Q-V$ de una clase de servicio particular es necesario conocer la composición de la carga de los clientes que pertenecen a dicha clase. Por ejemplo, se requiere información relacionada al tipo de dispositivos eléctricos, clasificación de los dispositivos, su ciclo y factor de uso. De esta manera, es posible obtener un modelo ZIP equivalente para cada clase dependiendo de los coeficientes ZIP de cada dispositivo y de su porcentaje de participación con respecto al total de la carga. Realizando un proceso similar, es posible obtener un modelo ZIP equivalente del sistema, el cual debe ser validado con pruebas o ensayos experimentales [14].

En la Figuras 2-5 y 2-6 se puede observar el comportamiento de los tres tipos de carga que componen el modelo ZIP. Se muestra como varía el consumo de potencia y corriente dependiendo de la tensión de alimentación. De esta manera, se ilustra como existen diferentes respuestas a la técnica de CVR dependiendo de los diferentes tipos de cargas, por lo que contar con un modelo adecuado es crucial para el desarrollo de la técnica de CVR.

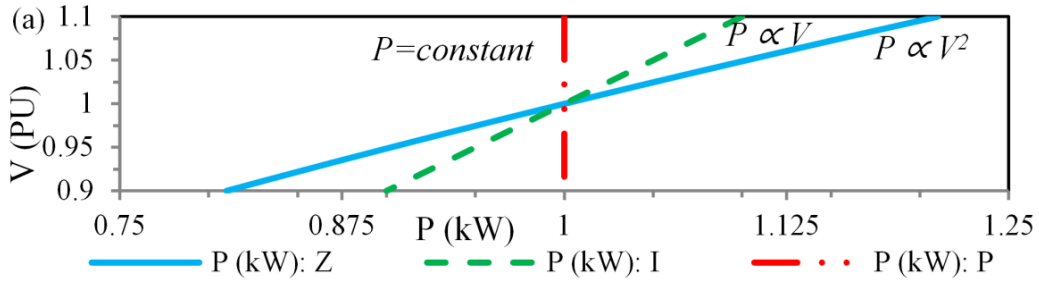


Figura 2-5. Relación entre la tensión de alimentación y la potencia de la carga utilizando el modelo ZIP [15].

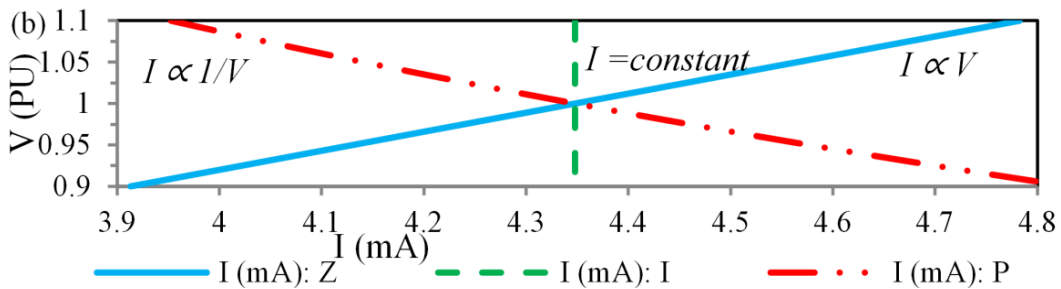


Figura 2-6. Relación entre la tensión de alimentación y la corriente demandada de la carga utilizando el modelo ZIP [15].

A manera de ejemplo, en [12] se presenta resultados experimentales del consumo de potencia activa y reactiva de diferentes cargas representativas de los clientes de tipo residencial (bombillas incandescentes, televisores, ventiladores, luces fluorescentes), en las cuales la tensión de alimentación varía desde los 100 V hasta los 126 V. En la Tabla 2-1 se presenta un resumen de los coeficientes estimados del modelo ZIP tanto para la potencia activa, así como también para el factor de potencia. Los términos $\alpha_{1,fp}$, $\alpha_{2,fp}$ y $\alpha_{3,fp}$ corresponden a los coeficientes de impedancia constante, corriente constante y potencia constante del factor de potencia respectivamente. Las gráficas de los consumos de potencia para las diferentes cargas se muestran de la Figura 2-7 a la Figura 2-15, en donde los consumos obtenidos de mediciones P_m y Q_m se muestran en azul, en tanto que los consumos obtenidos empleando los coeficientes ZIP ajustados se muestra con una línea roja.

Tabla 2-1. Coeficientes del modelo ZIP para diferentes cargas residenciales.

Carga	$\alpha_{1,p}$ %	$\alpha_{2,p}$ %	$\alpha_{3,p}$ %	$\alpha_{1,fp}$ %	$\alpha_{2,fp}$ %	$\alpha_{3,fp}$ %
Bombilla Incandescente 70 W	57.11%	42.57%	0.32%	1.00%	-1.00%	1.00%
Televisión (tubo de rayos catódicos)	0.15%	82.66%	17.19%	-0.99%	1.00%	-0.92%
Ventilador oscilante	73.32%	25.34%	1.35%	0.97%	0.95%	-1.00%
Pantalla de cristal líquido (LCD) – Dell	-40.70%	46.29%	94.41%	-0.97%	-0.98%	-0.97%
Televisión plasma	-32.07%	48.36%	3.71%	0.85%	0.91%	-0.99%
Pantalla de cristal líquido (LCD) - Clarity TV	-3.83%	3.96%	99.87%	0.61%	-0.54%	-1.00%
Luz fluorescente compacta (CFL) 13W	40.85%	0.67%	58.49%	-0.88%	0.42%	-0.78%
Luz fluorescente compacta (CFL) 20W	-1.05%	100.00%	1.05%	0.00%	-0.81%	0.90%
Luz fluorescente compacta (CFL) 42W	48.67%	-37.52%	88.84%	-0.97%	-0.70%	-0.79%

- Bombilla Incandescente de 70W

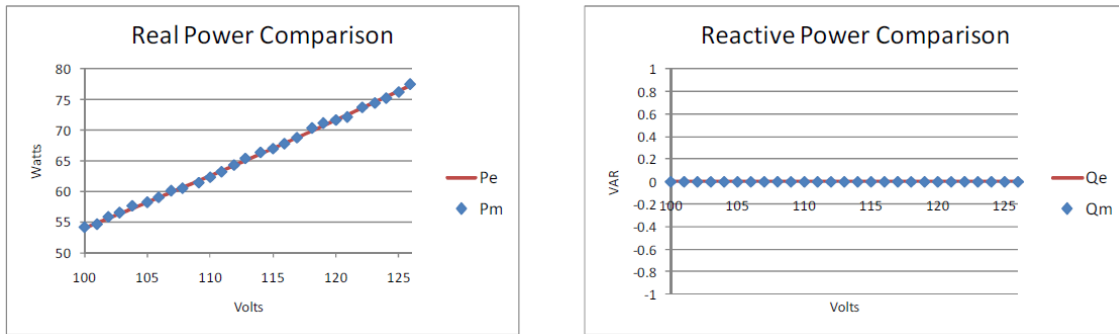


Figura 2-7. Efectos de la variación de la tensión en la potencia activa y reactiva de una bombilla incandescente de 70W [12].

- Televisión (tubo de rayos catódicos)

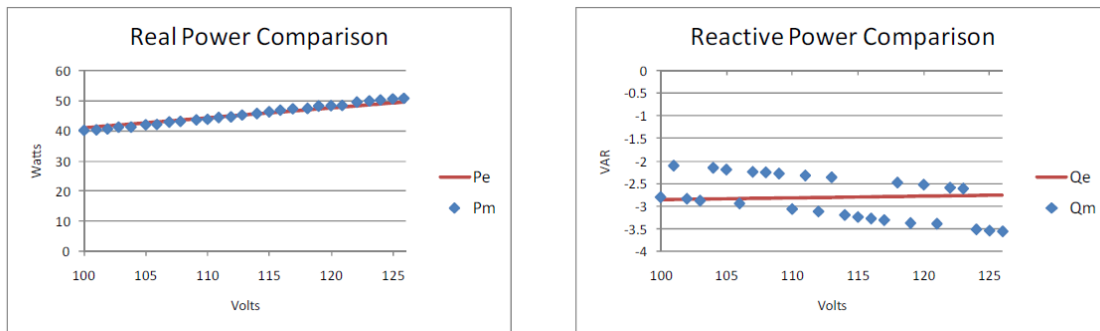


Figura 2-8. Efectos de la variación de la tensión en la potencia activa y reactiva de una televisión (tubo de rayos catódicos) [12].

- Ventilador oscilante

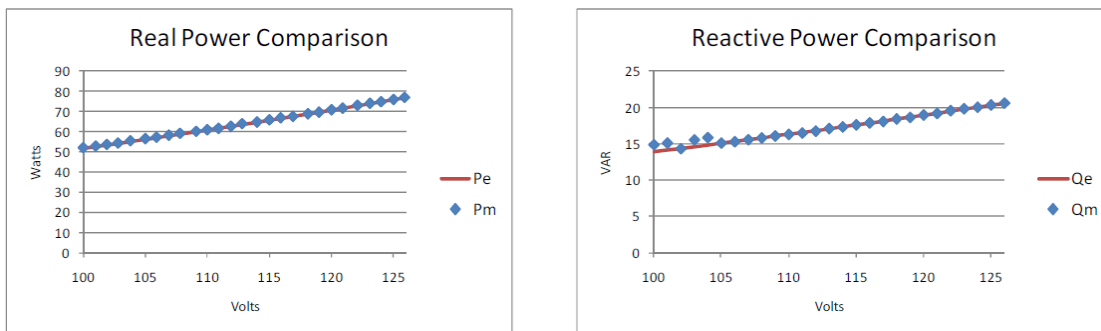


Figura 2-9. Efectos de la variación de la tensión en la potencia activa y reactiva de un ventilador oscilante [12].

- Pantalla de cristal líquido (LCD) – Dell

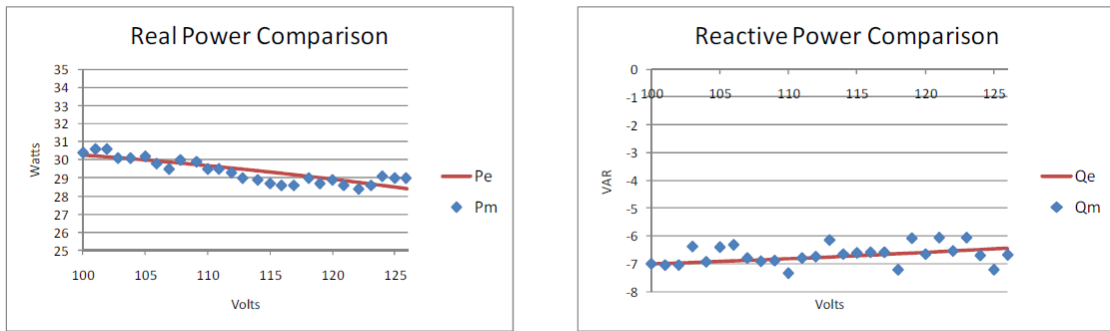


Figura 2-10. Efectos de la variación de la tensión en la potencia activa y reactiva de un LCD – Dell [12].

- Televisión plasma

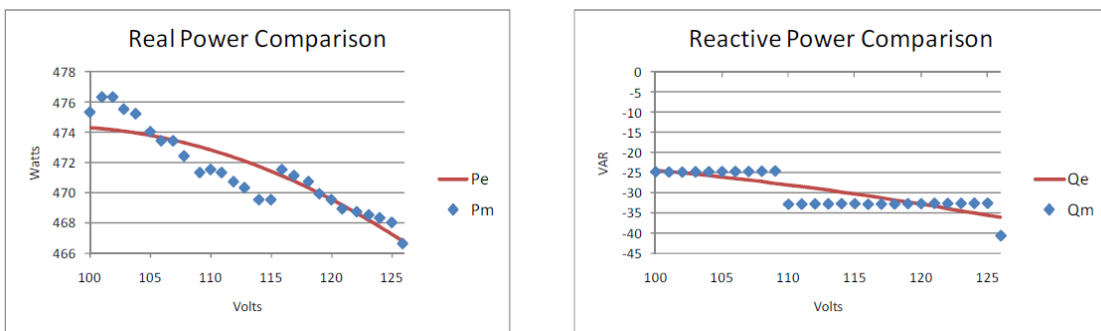


Figura 2-11. Efectos de la variación de la tensión en la potencia activa y reactiva de una televisión de plasma [12].

- Pantalla de cristal líquido (LCD) - Clarity TV

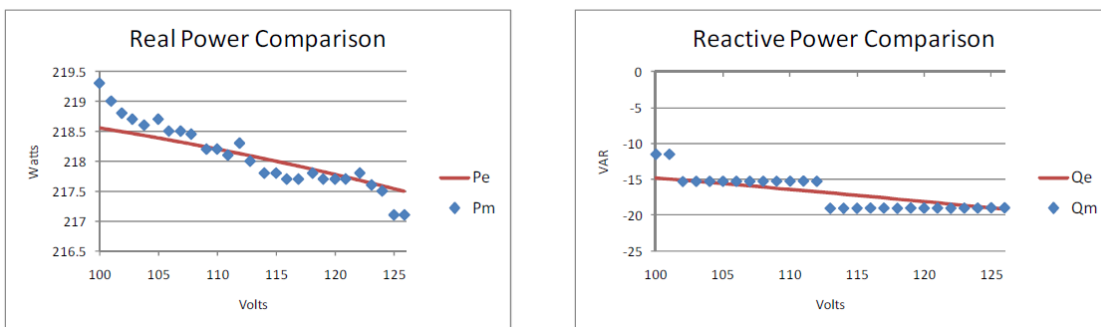


Figura 2-12. Efectos de la variación de la tensión en la potencia activa y reactiva de un LCD – Clarity TV [12].

- Luz fluorescente compacta (CFL) 13W

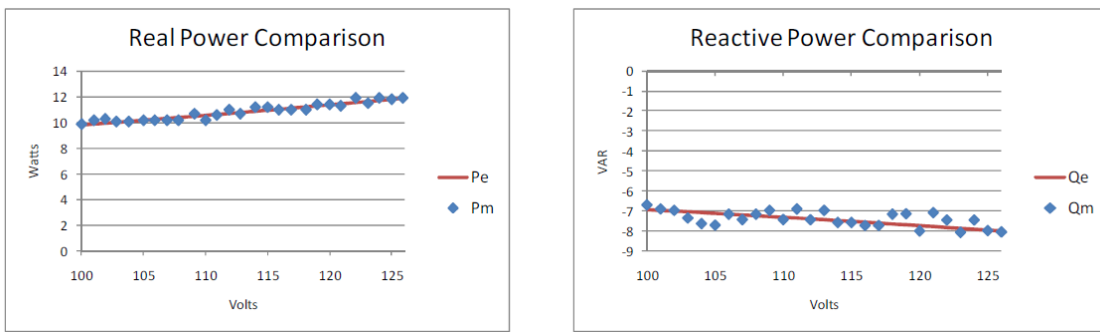


Figura 2-13. Efectos de la variación de la tensión en la potencia activa y reactiva de una luz fluorescente compacta (CFL) 13W [12].

- Luz fluorescente compacta (CFL) 20W

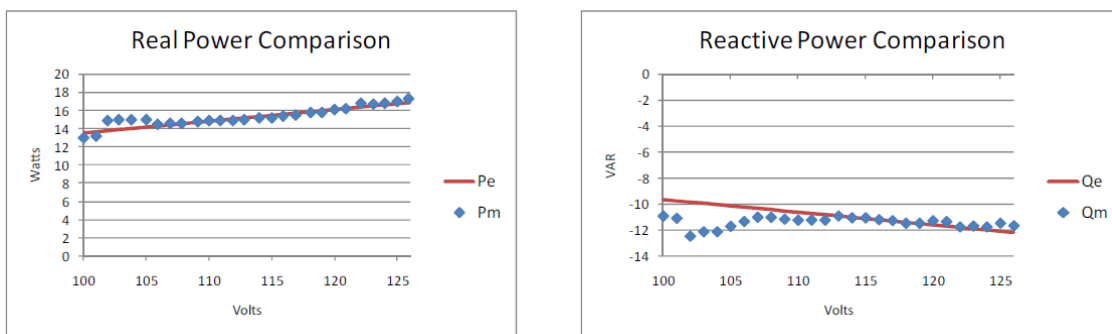


Figura 2-14. Efectos de la variación de la tensión en la potencia activa y reactiva de una luz fluorescente compacta (CFL) 20W [12].

- Luz fluorescente compacta (CFL) 42W

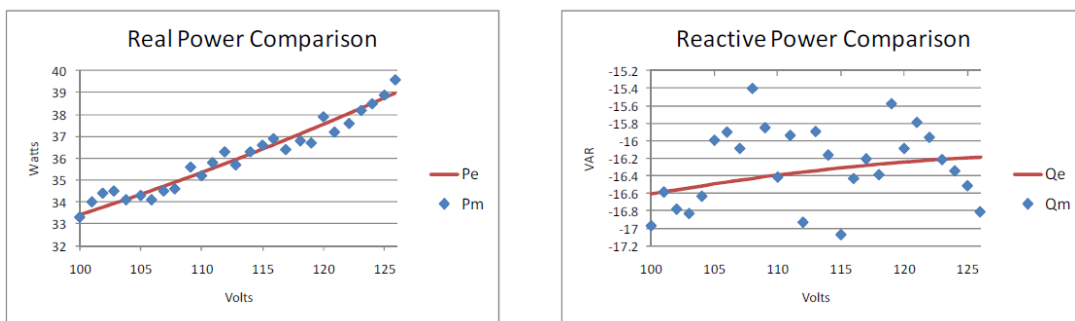


Figura 2-15. Efectos de la variación de la tensión en la potencia activa y reactiva de una luz fluorescente compacta (CFL) 42W [12].

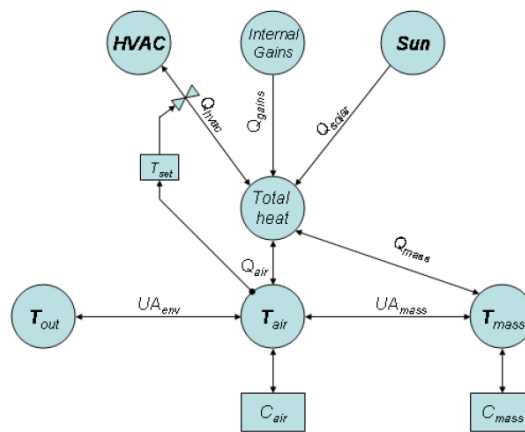
Las representaciones de las cargas obtenidas utilizando el modelo ZIP no siempre son fácilmente comprensibles. Por ejemplo, una bombilla incandescente no se comporta como una carga con impedancia constante del 100%, al igual que un ventilador no actúa como una carga de potencia constante al 100%. Además, los coeficientes del modelo pueden tener valores negativos, lo que añade complejidad al comportamiento de la carga. Además, como se mencionó previamente, es posible obtener modelos ZIP compuestos en un punto de interconexión que involucra clientes residenciales, comerciales e industriales. Esto proporciona un modelo que permite una evaluación más adecuada de los efectos de la implementación de la técnica de CVR [12].

2.3.2 Cargas con ciclos térmicos

Todas las cargas, posean ciclos térmicos o no, deben tener un comportamiento similar al de una carga ZIP en

cuanto a su consumo de energía dependiente de la tensión. Sin embargo, existe cierta complicación cuando las cargas poseen ciclos térmicos. Dicha complejidad está relacionada a la necesidad de un bucle de control adicional, el cual determina cuando la carga se pone en funcionamiento y por cuanto tiempo esta permanece energizada. De esta manera, para las cargas de circuito cerrado, como por ejemplo los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC, del inglés Heating, Ventilation, and Air Conditioning) se emplea un modelo de parámetro térmico equivalente (ETP, del inglés Equivalent Thermal Parameter). En el modelo ETP, la demanda de energía de los sistemas HVAC se representa en función de diversos parámetros, siendo estos la entrada solar, la temperatura, la humedad, la tensión y los puntos de ajuste termostáticos [12].

A manera de ejemplo, en la Figura 2-16 se muestra el diagrama del modelo ETP empleado para un sistema HVAC residencial. Se emplea ecuaciones diferenciales para describir el comportamiento térmico del edificio, y con ello se determina el consumo de energía de los sistemas HVAC [12].



- C_{air} : air heat capacity
- C_{mass} : mass heat capacity
- UA_{env} : the gain/heat loss coefficient between air and outside
- UA_{mass} : the gain/heat loss coefficient between air and mass
- T_{out} : air temperature outside the house
- T_{air} : air temperature inside the house
- T_{mass} : mass temperature inside the house
- T_{set} : temperature set points of HVAC system
- Q_{air} : heat rate to house air
- Q_{gains} : heat rate from appliance waste heat
- Q_{hvac} : heat rate from HVAC
- Q_{mass} : heat rate to house mass
- Q_{solar} : heat rate from solar gains

Figura 2-16. Modelo ETP empleado en un sistema HVAC residencial [12]

2.4 Factor CVR

Como se menciona anteriormente, uno de los desafíos técnicos más importantes consiste en evaluar de manera adecuada los efectos de implementar la técnica de CVR en la red de distribución. Esto se debe a que en la mayoría de los casos existe una falta de medición precisa del consumo que demanda la carga durante el tiempo en el que se aplica la técnica de CVR. Además, resulta necesario distinguir los cambios en el consumo de energía y en el comportamiento de la carga debido a la implementación de la técnica de CVR de otros factores adicionales que puedan influir en dichos cambios [9].

Para evaluar los efectos de la aplicación de la técnica de CVR se emplea el denominado factor CVR. Existen tres factores CVR que se utilizan: uno para la potencia activa (kW), uno para la potencia reactiva (kvar) y otro para la energía (kWh). El factor CVR se define como la relación que existe entre el porcentaje de reducción de la potencia activa, de la potencia reactiva o de la energía, y el correspondiente porcentaje de reducción de la tensión [3]. A continuación, se presentan las ecuaciones de los tres factores mencionados anteriormente.

$$CVR_{f(kWh)} = \frac{\% \text{ de reducción en el consumo de energía}}{\% \text{ de reducción en la tensión}} \quad (2-8)$$

$$CVR_{f(kW)} = \frac{\% \text{ de reducción en el consumo de potencia activa}}{\% \text{ de reducción en la tensión}} \quad (2-9)$$

$$CVR_{f(kvar)} = \frac{\% \text{ de reducción en el consumo de potencia reactiva}}{\% \text{ de reducción en la tensión}} \quad (2-10)$$

Los factores CVR muestran grandes variaciones entre subestaciones, entre alimentadores y especialmente entre cargas. Tanto las diferentes cargas de los consumidores, las características de los conductores y transformadores, los esquemas de control de tensión gobernados por los reguladores de tensión, los bancos de condensadores conmutados y los compensadores de caída de línea influyen en el factor CVR global. Debido a la gran cantidad de elementos involucrados, las empresas distribuidoras generalmente calculan este factor de manera experimental para los alimentadores y subestaciones, y no de manera teórica [16]. La estimación del factor CVR demanda un extenso conjunto de datos tanto de la carga como de la tensión para cada uno de los circuitos habilitados para la implementación de la técnica de CVR, a lo largo de un extenso período de tiempo. Es por esta razón que numerosas empresas de distribución optan por calcular el factor CVR para un número específico de circuitos y, posteriormente, derivan un valor promedio del factor CVR, el cual se emplea para evaluar los demás circuitos comprendidos en su área de servicio [9]. Este enfoque permite obtener una visión más generalizada de los efectos de la técnica de CVR en la red de distribución sin incurrir en un exceso de recursos y tiempo para calcular individualmente los factores CVR de todos los circuitos.

Dado que la determinación del factor CVR no es una ciencia exacta, es posible que se presenten diferentes valores, e incluso, que el factor CVR se encuentre dentro de un rango de posibles valores. Para ejemplificar lo antes mencionado, se muestra en la Tabla 2-2 un conjunto de valores del $CVR_{f(kWh)}$ de once referencias, de las cuales seis corresponden a pruebas de campo y las cinco restantes corresponden a las obtenidas gracias a modelos y simulaciones. De igual manera se muestra los factores $CVR_{f(kW)}$ y $CVR_{f(kvar)}$ de las referencias que publican estos valores, así como también comentarios relevantes de las once referencias antes mencionadas, como de otras publicaciones [3].

Tabla 2-2 Factores CVR de diferentes referencias [3].

Id	Año de Publicación	Resultado de	CVR_f			Comentarios
			(kWh)	(kW)	(kvar)	
1	1978	-	0.62	-	-	Residencial: $CVR_{f(kWh)} = 0.61$ Comercial: $CVR_{f(kWh)} = 0.89$ Industrial: $CVR_{f(kWh)} = 0.35$
2	1982	Pruebas en Campo, 11 alimentadores	0.47 1.04	- 0.548 0.967	- -	Residencial: $CVR_{f(kWh)} = 1.14^*$ $CVR_{f(kW)} = 1.14^*$ Comercial: $CVR_{f(kWh)} = 0.26^*$ $CVR_{f(kW)} = 0.08^*$ *: Valor sugerido
3	1984	Simulación	0.409 0.991	- -	- -	Residencial: $CVR_{f(kWh)} = 0.765$ Comercial: $CVR_{f(kWh)} = 0.991$

						Industrial: $CVR_{f(kWh)} = 0.409$
4	1986	-	0.71	-	-	Residencial: $CVR_{f(kWh)} = 0.73$ Comercial: $CVR_{f(kWh)} = 0.84$ Industrial: $CVR_{f(kWh)} = 0.49$ Global: $CVR_{f(kWh)} = 0.71$
5	1987	Pruebas en Campo, 32 alimentadores	0.57 1.35	-	-	Promedio: $CVR_{f(kWh)} = 1.00$
6	1991	Pruebas en Campo, 12 alimentadores	0.336 1.103	-	-	Residencial: $CVR_{f(kWh)} = 0.330 - 0.676$ Comercial: $CVR_{f(kWh)} = 0.893 - 1.103$ Global: $CVR_{f(kWh)} = 0.62$ Estimación: Una reducción de la tensión en un 3% reducirá el consumo de energía en un 1.5%
7	2002	-	0.336 1.103	-	-	Promedio: $CVR_{f(kWh)} = 0.62$ Estimación: Una reducción de la tensión en un 5% reducirá el consumo de energía en un 4.17%
8	2002	Simulación	-	-	-	Estimación: Una reducción de la tensión en un 2.5% reducirá el consumo de energía en un 1.3%
9	2011	Simulación, 24 alimentadores	-	-	-	Reducción de la demanda pico de la carga y del consumo energético anual del 0.5% - 4%
10	2011	Simulación, IEEE Sistema de 13 Nudos	0.67 1.33	-	-	En este estudio se considera la influencia de sistemas fotovoltaicos
11	2011	-	-	0.6 0.95	2.0 6.0	Promedio: $CVR_{f(kWh)} = 0.62$ (asumido) Promedio: $CVR_{f(kvar)} = 3.00$ (asumido)
12	2012	Simulación	0.4	-	-	Sector Residencial
13	2012	Pruebas en Campo	0.92	-	-	Ahorros energéticos superiores al 4% Ahorro anual estimado del 2.8%
14	2012	Pruebas en Campo, 4 alimentadores	-	0.16 1.19	- 3.0	Promedio: $CVR_{f(kWh)} = 0.7$ Ahorro anual estimado de energía activa 0.16% - 1.2%
15	2013	Pruebas en Campo	0.95	-	-	
16	-	Pruebas en Campo	0.3 0.86	- 0.17 0.93	- 1.99 20.12	Una reducción de la tensión entre 2% - 4% produce una reducción entre el 1% - 3% de la energía y de la demanda pico

De acuerdo con los valores de los factores $CVR_{f(kWh)}$ presentados en la Tabla 2-2, se observa claramente cómo el tipo de cliente residencial, comercial e industrial influye notablemente en el valor del factor, y cómo estos factores presentan diferentes valores para las distintas referencias. Para ejemplificar esto, se muestra en la Figura 2-17 un gráfico del factor $CVR_{f(kWh)}$ de las referencias que estiman este factor.

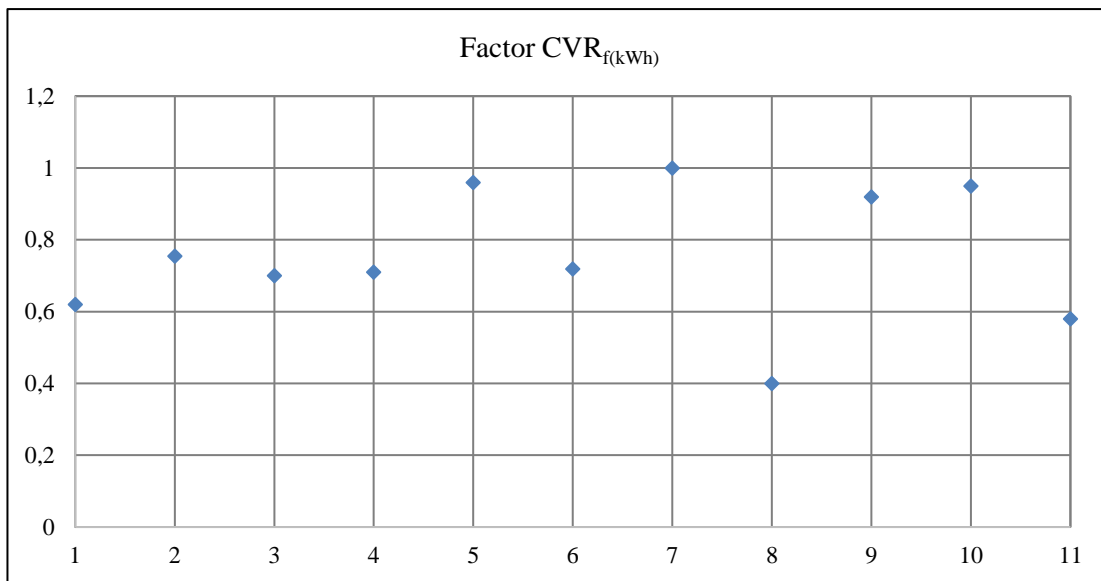


Figura 2-17. Valores del factor $CVR_{f(kWh)}$ de diferentes referencias.

En la Figura 2-17, está representado el valor promedio del factor en caso de que este se encuentre dentro de un rango de valores. Sin contar con el valor de 0.4 al ser pequeño, el factor $CVR_{f(kWh)}$ se encuentra dentro del rango 0.58 – 1, siendo el valor promedio de 0.79. Esta es una estimación semiempírica de este valor [3]. Lo anterior concuerda en gran medida con el valor estándar típico del factor $CVR_{f(kWh)}$ que es 0.7. Sin embargo, el valor del factor $CVR_{f(kWh)}$ depende de diversos factores y puede estar dentro del rango 0-1.5. Entre los factores que influyen en el valor del factor CVR se encuentran el tipo y la diversidad de carga, los cambios en el consumo a lo largo del día y entre estaciones, efectos relacionados al clima y los efectos ocasionados por el comportamiento de los clientes. Además, los mejores resultados de la implementación de la técnica de CVR se observan en los clientes de tipo residencial y comercial [17].

Como se mencionó previamente, los factores CVR pueden variar a lo largo del día y de acuerdo con de la estación del año. Eso es debido a la variación de la carga a lo largo del día y de que existen cargas que son más predominantes dependiendo de la estación, como por ejemplo los sistemas de aire acondicionado durante el verano, o los sistemas de calefacción durante el invierno [18]. De acuerdo con pruebas realizadas, los factores CVR tienden a ser más altos en verano y más bajos en invierno [4]. En la Figura 2-18 se muestra como varía el factor $CVR_{f(kWh)}$ en un día para cada una de las estaciones del año para ejemplificar lo antes mencionado.

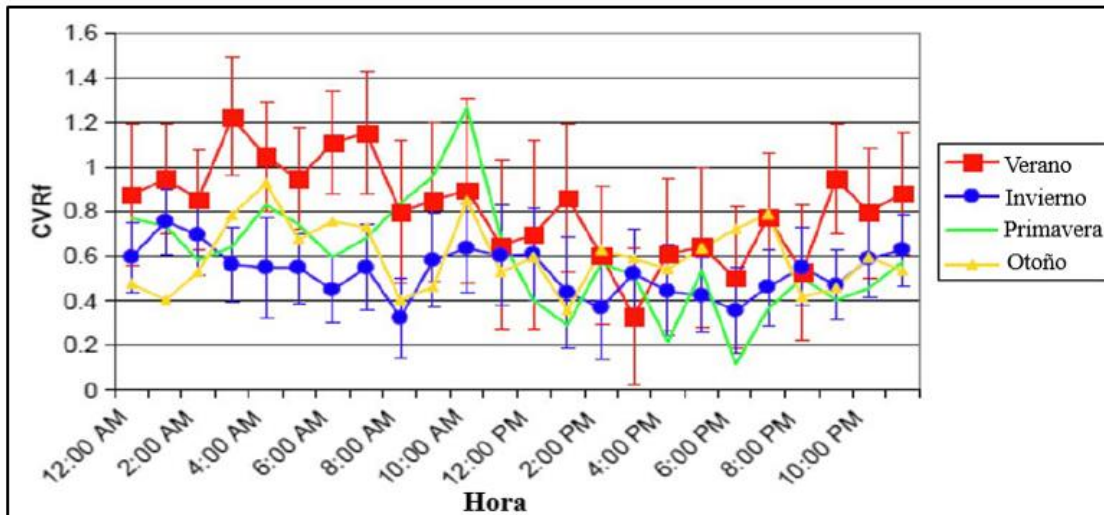


Figura 2-18. Factor $CVR_{f(kW)}$ a lo largo del día en cada una de las cuatro estaciones [18].

En cuanto al factor de la potencia reactiva $CVR_{f(kvar)}$, no existen muchas publicaciones en la literatura, sin embargo, el efecto que tiene el reducir la tensión es mucho más grande con respecto a los obtenidos con los otros factores. El hecho de que el factor $CVR_{f(kvar)}$ sea más elevado se atribuye a que la potencia reactiva es mucho más sensible a los cambios en la tensión de alimentación [19]. Un valor comúnmente aceptado en la literatura para el factor $CVR_{f(kvar)}$ es de 3.00 [3], el cual demuestra como con reducir 1% el valor de la tensión se reduce el consumo de potencia reactiva en un 3%, no obstante, en caso de necesitar este factor, es necesario estimarlo, ya que el valor del factor puede ser totalmente diferente al valor teórico. A manera de ejemplo, en [19] se estima el valor del factor $CVR_{f(kvar)}$ empleando los datos del Sistema de la Corporación de Energía Eléctrica de Corea, y de acuerdo a los resultados el valor del factor estimado está dentro del rango 7.807 – 14.857, lo cual difiere del valor convencionalmente aceptado.

2.5 Estrategias de uso de la técnica de CVR

Se puede identificar dos estrategias principales en el enfoque de la implementación de la técnica de CVR. La primera de ellas se basa en reducir la demanda a corto plazo, aplicándola en horas específicas del día (generalmente durante los momentos de máxima demanda). En este enfoque, la tensión de alimentación se reduce temporalmente para aliviar la carga en la red eléctrica. La segunda estrategia se enfoca en la reducción sostenida de la energía a largo plazo, buscando economizar la energía al mantener permanentemente una tensión de suministro más baja en la red eléctrica. Aunque estas dos estrategias generan efectos distintos, las aplicaciones existentes han demostrado su eficacia en términos de ahorro energético y disminución de la demanda [20]. La Figura 2-19 ilustra la comparativa entre ambas estrategias.

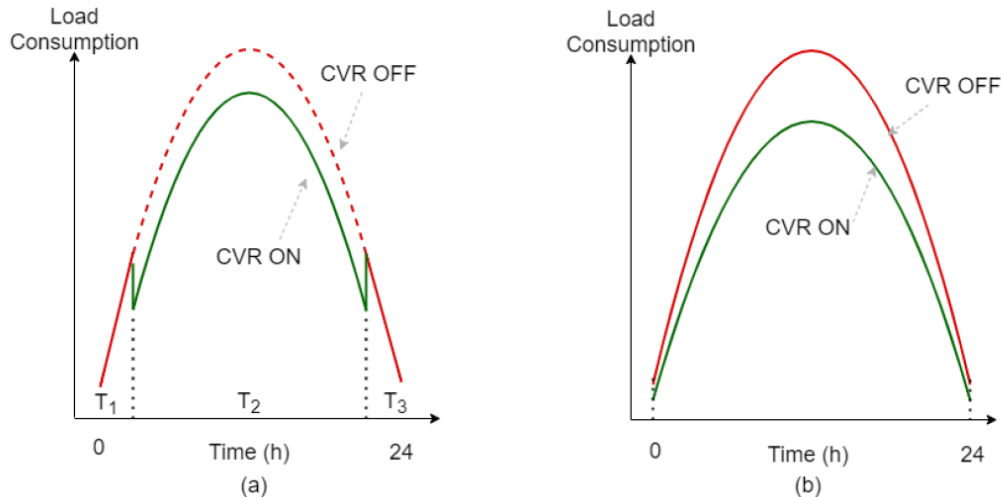


Figura 2-19. a) Reducción de la demanda a corto plazo y b) Reducción de la energía a largo plazo [20].

Además de las dos estrategias antes mencionadas, en [20] se presenta otros enfoques que convierten a la técnica de CVR en una excelente solución para su uso en las redes de distribución. Así:

- Es factible la implementación de la técnica de CVR a casi todos los consumidores, especialmente los que se conectan a la red de baja tensión, lo que es de gran importancia para los operadores de la red.
- La implementación de la técnica de CVR es aplicable en toda el área de servicio de la compañía distribuidora, ya que no es necesaria una participación de los usuarios finales de la energía.
- Es poco probable que los usuarios puedan identificar la estrategia en acción, ya que no afecta la operación de los dispositivos eléctricos ni disminuye significativamente su rendimiento.
- La técnica de CVR se presenta como una solución flexible y adaptable en lugar de una solución estática única, permitiendo ajustes en función de las variaciones en el comportamiento de la red mediante un proceso de retroalimentación tradicional.
- Las inversiones en las redes de distribución no representan ningún inconveniente, ya que, en caso de ser necesarias, es probable que sean de escala reducida. Además, los sistemas de distribución y subtransmisión están equipados adecuadamente con dispositivos de regulación de tensión que pueden ser empleados para implementar la técnica de CVR.

2.6 Métodos de evaluación de los efectos de la técnica de CVR

Evaluar las implicaciones de implementar la técnica de CVR en los circuitos de alimentación de la red de distribución es un tema de gran importancia para las compañías. Esto incluye la elección de los circuitos particulares donde se implementará la técnica de CVR, así como el análisis de los costos y beneficios asociados. Identificar los efectos que produce la reducción de la tensión en la carga y en el consumo de energía, separándolas de otros elementos de influencia, constituye el principal reto al momento de evaluar los efectos de la técnica de CVR [4].

Los métodos existentes para evaluar los efectos de la técnica de CVR pueden agruparse en cinco categorías [7]:

- i) Métodos basados en comparación.
- ii) Métodos basados en regresión.
- iii) Métodos basados en simulación.
- iv) Métodos basados en síntesis.
- v) Métodos basados en datos.

Los cinco métodos mencionados permiten analizar el ahorro energético a nivel de alimentador. Sin embargo, como las empresas de distribución operan con una gran cantidad de alimentadores, es necesario contar con una

metodología que permita evaluar los efectos de la técnica de CVR en el sistema o en el grupo de alimentadores en los cuales se aplica esta técnica [21]. A continuación, se detalla las cinco categorías previamente mencionadas.

2.6.1 Métodos basados en Comparación

Los métodos basados en comparación utilizan los datos operativos en situaciones en donde la técnica de CVR está activada y desactivada. Así, determinan el factor CVR al contrastar esos dos escenarios. Al primer escenario (CVR activada) se le conoce como “tratamiento” y al segundo escenario (CVR desactivada) se le conoce como “control”. Existen dos categorías principales en los métodos basados en comparación: alimentador correlacionado y clima correlacionado [9]. Empleando las mediciones obtenidas de los dos enfoques se puede calcular los efectos de la técnica de CVR [4]. En la Figura 2-20 se muestra un diagrama de los dos enfoques antes mencionados.

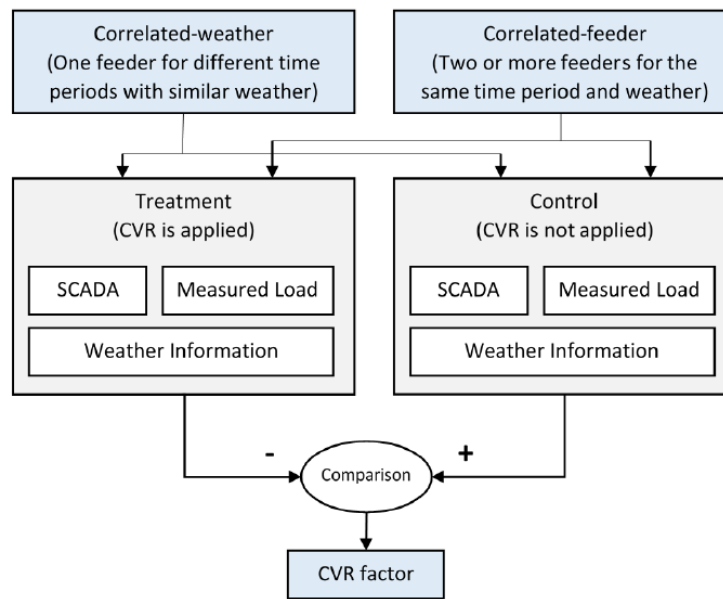


Figura 2-20. Métodos basados en comparación [9].

2.6.1.1 Enfoque del clima correlacionado

El enfoque de clima correlacionado compara el funcionamiento de un alimentador en situaciones con CVR activada (tratamiento) y con CVR desactivada (control). En la situación de tratamiento se implementa la técnica de CVR a un alimentador de prueba y en la situación de control, al mismo alimentador de prueba, en otro periodo de tiempo y con condiciones climáticas similares, se le hace trabajar a valores normales de tensión. Así, el factor CVR se calcula a través de la comparación de las medidas obtenidas de las dos pruebas. En este enfoque se busca un día de referencia para poder realizar el emparejamiento de los diferentes días. El día de referencia debe poseer características similares en cuanto a sus condiciones de operación, principalmente en lo relacionado a la carga y a la temperatura, aunque se puede incluir otros elementos tales como el día de la semana, la estación del año, presencia de humedad y nieve [9].

2.6.1.2 Enfoque de alimentador correlacionado

El enfoque del alimentador correlacionado compara al mismo tiempo el funcionamiento de un alimentador con CVR activada (tratamiento) con otro alimentador con CVR desactivada (control). Debe existir una fuerte correlación entre el alimentador de control con el alimentador de tratamiento, especialmente en cuanto a las características de los alimentadores, composición de la carga, características de los clientes, curva y nivel de carga y factor de potencia. Se puede tener en cuenta otras consideraciones para disminuir la variabilidad, ya sea que los emparejamientos se generen solo entre alimentadores de una misma zona geográfica o buscar similitudes en los emparejamientos tomando en consideración factores que puedan afectar al consumo como por ejemplo los factores económicos [9].

De acuerdo con varios estudios, los alimentadores de tratamiento y control de clientes residenciales son

similares en los perfiles de carga en cuanto a su forma y nivel; en tanto que, para los clientes no residenciales los perfiles de carga son similares en forma, pero no en nivel de utilización. Lo anterior demuestra la importancia de emparejar adecuadamente los alimentadores de tratamiento y control, especialmente cuando estos tengan clientes no residenciales. En comparación con el enfoque de clima correlacionado, este enfoque es más claro y rápido; no obstante, encontrar alimentadores que estén correlacionados suele ser un gran desafío. Se puede emplear métodos estadísticos, específicamente un análisis de correlación, para emparejar dos alimentadores que presenten una fuerte correlación entre ellos [9].

Es de suma importancia que al momento de obtener los datos de los alimentadores de tratamiento y control no se genere transferencias de carga u otros comportamientos atípicos, por lo que es necesario realizar un análisis adicional, ya sea de manera manual o automática. En caso de que el análisis se realice de manera manual, el equipo encargado debe verificar que no se hayan producido transferencias de carga, lo cual puede lograrse mediante la comprobación del número de clientes conectados al alimentador. Del mismo modo, el equipo deberá identificar si existen o no comportamientos atípicos. A modo de ejemplo, se considera como comportamientos atípicos las interrupciones de suministro, los picos anormales en la tensión y en la carga. En caso de las interrupciones, los periodos de tiempo en los que se hayan registrado las interrupciones pueden ser excluidos del análisis. En relación a los picos anormales de tensión y carga, se pueden establecer umbrales de corte adecuados para garantizar la calidad de los datos. Por otro lado, si el análisis se lleva a cabo de manera automática, es necesario programar los procedimientos mencionados previamente [9].

2.6.1.3 Ventajas y Desventajas de los métodos basados en comparación

Ventajas

- Facilidad de implementación y la simplicidad de los métodos basados en comparación [9].

Desventajas

- Existen factores que pueden introducir ruido en las mediciones, ya sean las variaciones en el clima en el enfoque de clima correlacionado o las variaciones en la carga en el enfoque del alimentador correlacionado, lo que podría resultar en cálculos erróneos del factor CVR. El ruido presente puede ocultar por completo los efectos de la técnica de CVR, ya que estos son generalmente pequeños [9].
- Otra desventaja de este método guarda relación con la dependencia del factor CVR con el tiempo, ya que a medida que los datos se promedian, esa dependencia puede perderse [9].
- La ausencia de un buen grupo de control [4], la indisponibilidad de modelos detallados del sistema y problemas relacionados a la obtención de los datos pueden incluirse de igual manera como desventajas de este método [1].

2.6.2 Métodos basados en regresión

Los métodos basados en regresión utilizan un modelo para estimar las cargas en función de varios factores, como la temperatura, la humedad, la tensión, la intensidad solar, día de la semana, entre otros. Normalmente, se emplea una regresión lineal para desarrollar este modelo. El factor de CVR se determina al comparar las salidas del modelo bajo condiciones de CVR activada y desactivada. Existen dos enfoques que se usan generalmente en los métodos basados en regresión: regresión lineal y diferencia en diferencias [7] [9].

2.6.2.1 Enfoque de regresión lineal

El proceso para calcular el factor CVR utilizando el enfoque de regresión lineal consta de varias etapas. La primera etapa consiste en la estimación de los parámetros del modelo en donde se emplea un modelo lineal de la carga en función de la temperatura, y la estimación resultante se muestra en la ecuación (2-11). Tanto las mediciones de la carga como de la temperatura constituyen los datos de entrenamiento del modelo. La resolución de las mediciones, por ejemplo, cada 15 minutos, dependen de la combinación de los dispositivos de medición utilizados junto con las configuraciones seleccionadas por el usuario [4].

$$L(MW) = \beta_0 1 + \beta_1 [T_{fh} 1 - T] + \beta_2 [T_{fc} 1 - T] + \varepsilon \quad (2-11)$$

Donde:

- L : Datos de la carga medidos con la técnica de CVR desactivada.
- T : Datos de la temperatura ambiente registrada con la técnica de CVR desactivada.
- T_{fh} : Temperatura de referencia de calefacción.
- T_{fc} : Temperatura de referencia de refrigeración.
- $\beta_0, \beta_1, \beta_2$: Coeficientes del regresor.
- ε : Error.

La segunda etapa consiste en la estimación de los parámetros del modelo, para lo cual se utiliza el método de mínimos cuadrados para determinar el valor de los coeficientes de los regresores. Así:

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T L \quad (2-12)$$

$$X = [1T_{fh}1 - TT_{fc}1 - T] \quad (2-13)$$

$$\hat{\beta} = [\hat{\beta}_0 \hat{\beta}_1 \hat{\beta}_2]^T \quad (2-14)$$

Donde:

- $\hat{\beta}$: Coeficientes del regresor estimados.

La tercera etapa consiste en determinar el consumo de la carga bajo la condición de CVR desactivada. Utilizando los coeficientes estimados como referencia, es posible estimar el consumo de carga sin CVR en los días de prueba para una temperatura diferente, denotada como T^* .

$$L_{CVR-off} = \hat{\beta}_0 1 + \hat{\beta}_1 [T_{fh}1 - T^*] + \hat{\beta}_2 [T_{fc}1 - T^*] \quad (2-15)$$

Donde:

- $L_{CVR-off}$: Consumo de carga en ausencia de la técnica de CVR.

La cuarta etapa consiste en el cálculo del factor CVR. Las mediciones del consumo de carga cuando se aplica la técnica de CVR se lo realiza directamente en el alimentador. Otra manera de expresar el factor CVR se muestra en la ecuación (2-16).

$$CVR_f = \frac{\% \Delta L}{\% \Delta V} \quad (2-16)$$

$$\% \Delta L = \frac{L_{CVR-off} - L_{CVR-on}}{L_{CVR-off}} \cdot 100 \quad (2-17)$$

$$\% \Delta V = \frac{V_{CVR-off} - V_{CVR-on}}{V_{CVR-off}} \cdot 100 \quad (2-18)$$

Donde:

- $\% \Delta L$: Porcentaje de reducción en el consumo de carga.
- $\% \Delta V$: Porcentaje de reducción en la tensión del alimentador.
- L_{CVR-on} : Consumo de carga en presencia de la técnica de CVR.
- $V_{CVR-off}$: Tensión de la red en ausencia de la técnica de CVR.
- V_{CVR-on} : Tensión de la red en presencia de la técnica de CVR.

En el método de regresión lineal presentado se modela la carga en función únicamente de la temperatura. Puede emplearse una regresión multivariable para representar la carga. En este caso, se debe calcular los coeficientes del regresor para cada una de las variables involucradas. Con frecuencia, se emplea la regresión

multivariable para detectar factores de impacto que inciden en la sensibilidad de las cargas [9]. A manera de ejemplo, la carga puede modelarse en función de la temperatura y de la tensión de la red, teniéndose la ecuación (2-19).

$$L(MW) = \alpha_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 \Delta V + \varepsilon \quad (2-19)$$

Donde:

- α_1 : Dependencia de la carga con respecto a la temperatura.
- α_2 : Dependencia de la carga con respecto a la tensión.

De igual manera que se estimó el factor CVR utilizando la temperatura, se puede emplear α_2 para estimar el factor CVR mediante un enfoque similar. El enfoque multivariable puede proporcionar resultados más precisos al tener en cuenta otras variables adicionales, como el día de la semana y mes [7].

Puede utilizarse modelos más complejos para expresar las relaciones no lineales entre las cargas y sus factores de impacto. Por ejemplo, en lugar de emplear una función lineal para modelar la carga se puede emplear una función logarítmica. Además, los métodos basados en regresión pueden emplear las mediciones de alimentadores de tratamiento y control, tal como sucede con los métodos basados en comparación. En este caso, la carga del alimentador de tratamiento se modela como una función de la carga del alimentador de control. En la ecuación (2-20) se muestra lo antes mencionado, en donde se emplea una función no lineal (logarítmica) de la carga del alimentador de control para modelar la carga del alimentador de tratamiento [9].

$$\log(L^{Tr}) = \beta_0 + \beta_1 \log(L^C) + \dots + \varepsilon \quad (2-20)$$

Donde:

- L^{Tr} : Carga del alimentador de tratamiento
- L^C : Carga del alimentador de control

2.6.2.2 Enfoque de Diferencia en Diferencias

La estimación del factor CVR puede llevarse a cabo mediante otro método estadístico basado en regresión denominado Diferencia en Diferencias (DID, del inglés Difference in Differences). En este método se emplea información acerca de la carga de un alimentador de control, información acerca del clima y otros factores, para simular la carga del alimentador de tratamiento si no se hubiera aplicado la técnica de CVR. Una explicación gráfica del enfoque DID se muestra en la Figura 2-21, en donde después de la implementación de la técnica de CVR, se simula la carga del alimentador de tratamiento en ausencia de la técnica de CVR. Lo anterior permite determinar el impacto de la implementación de la técnica de CVR en un alimentador, al comparar las variaciones en la carga de los alimentadores tanto de tratamiento como de control. En este método es necesario contar con información antes de iniciar el tratamiento y después de que este se haya aplicado. El enfoque DID es sumamente efectivo para reducir o eliminar sesgos. Los sesgos en las comparaciones pueden aparecer a lo largo del tiempo o en un periodo de tiempo posterior al tratamiento. En el primer caso, el sesgo en el grupo de tratamiento puede ser originado debido a otros factores que tienen influencia en la carga; en el segundo caso, el sesgo entre el grupo de tratamiento y control puede deberse a las diferencias constantes entre los dos grupos [9].

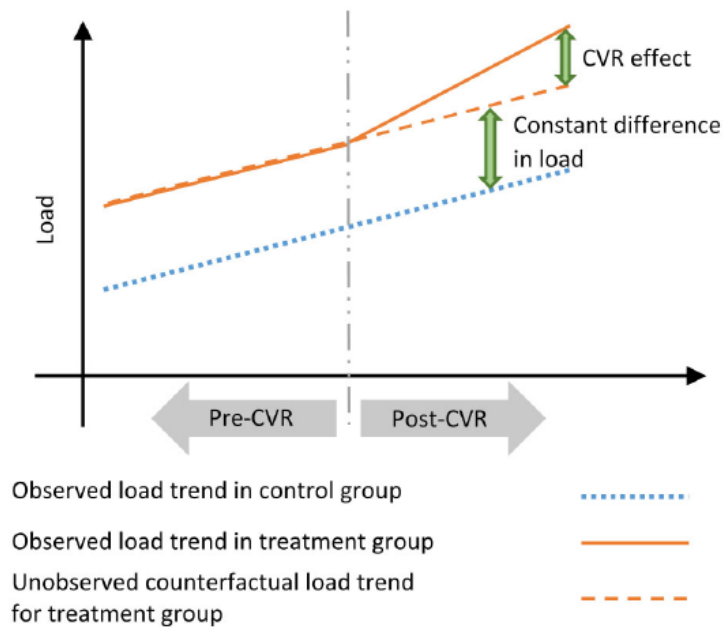


Figura 2-21. Explicación gráfica del enfoque DID [9].

2.6.2.3 Ventajas y Desventajas de los métodos basados en regresión

Ventajas

- Mayor precisión en relación a los métodos basados en comparación.
- Permiten una mayor comprensión del modelo de las cargas en función de sus factores de impacto a las empresas de distribución, esto último debido a que los modelos de regresión incorporan las interpretaciones físicas.

Desventajas

- Los errores en la estimación pueden enmascarar por completo los efectos producidos por la implementación de la técnica de CVR, por lo que existe una funcionalidad reducida.
- Las cargas son de naturaleza no lineal, lo que contrasta con que la mayoría de estos métodos emplean regresiones lineales para la estimación.

Una posible solución a estos inconvenientes es usar métodos de regresión basados en aprendizaje automático que, de acuerdo a la literatura, presentan un mayor grado de precisión y sofisticación [9].

2.6.3 Métodos Basados en Simulación

Los métodos basados en simulación utilizados para estimar los efectos de la técnica de CVR se apoyan en el modelado de la red, en el modelado de la carga y en la resolución de las ecuaciones de flujos de potencia. El consumo de carga se simula en la condición en la que la técnica de CVR no está activada. Los modelos empleados para representar la carga pueden estar en función de la tensión de alimentación, del tiempo y de factores meteorológicos. En la Figura 2-22 se muestra el diagrama de flujo de este método. El factor CVR se estima mediante la comparación de dos escenarios: el primero se basa en el consumo de energía demandada por la carga con la técnica de CVR activada, mientras que el segundo se deriva de la resolución del flujo de potencia. La diferencia entre estos dos escenarios proporciona el valor del factor CVR. Para las mediciones del consumo de la carga se emplea sistemas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA) en tanto que para estimar la carga del alimentador en el escenario con la técnica de CVR desactivada, se emplea la resolución en tiempo real de las ecuaciones de flujos de potencia. Generalmente en estos métodos el modelado de la red es detallado y de alta precisión. La dificultad radica en representar de manera efectiva la carga que genera el mayor impacto en cuanto al ahorro energético [4][7].

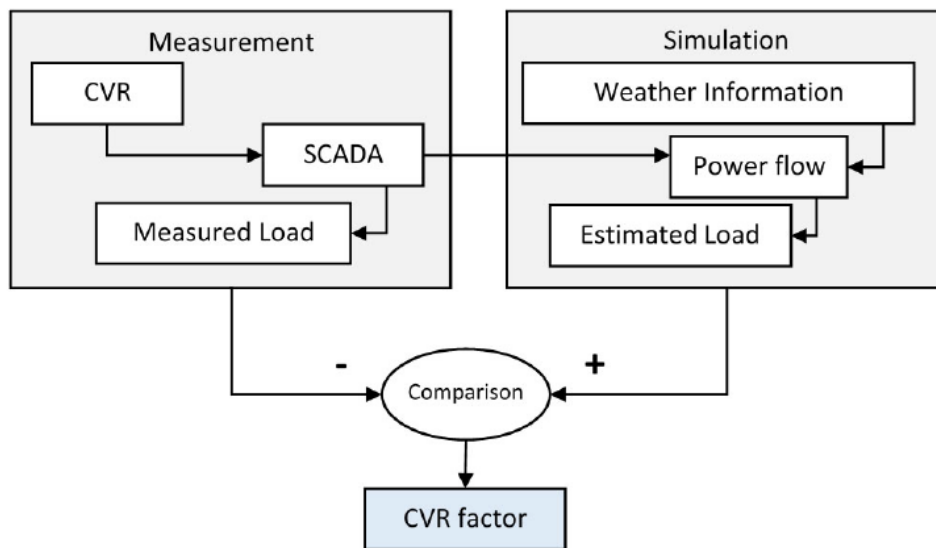


Figura 2-22. Diagrama de flujo de los métodos basados en simulación [9].

2.6.3.1 Ventajas y desventajas de los métodos basados en simulación

Ventajas

- La principal ventaja de este enfoque radica en la alta precisión y exactitud que se logra al estimar el factor CVR, siempre y cuando se disponga de un modelo de carga y red detallado y preciso [7].
- Otra ventaja es la posibilidad de que el sistema funcione de manera continua al utilizar este método [9].

Desventajas

- El principal desafío reside en la obtención de un modelo detallado y preciso de la carga, que sea capaz de evaluar de manera efectiva el impacto de la técnica de CVR y los ahorros de energía. Es fundamental emplear un modelo adecuado según el tipo de carga; por ejemplo, se puede utilizar modelos exponenciales, el modelo tradicional ZIP o modelos específicos para representar cargas de circuito abierto o cerrado. Para evitar la complejidad de modelar todos los componentes de la carga, una opción factible es obtener un modelo de la carga agregada a nivel de circuito [4][7].
- Otro inconveniente reside en que no todos los modelos son capaces de adaptarse a las variaciones dinámicas tanto en la carga como en los alimentadores, por lo que la estimación del factor CVR puede verse afectada. Una solución potencial es emplear modelos de carga que se adapten a los cambios dinámicos antes mencionados [4].
- Otra complicación de estos métodos guarda relación con la necesidad de emplear una sensibilidad carga-tensión (factor CVR) para la resolución de las ecuaciones de flujo de potencia, valor que se desconoce hasta que finaliza el análisis [9].

2.6.4 Métodos basados en síntesis

En los métodos basados en síntesis los efectos de la implementación de la técnica de CVR en un circuito se estiman en función de la sensibilidad carga-tensión (LTV, del inglés Load-To-Voltage). La dependencia LTV hace referencia a como varía la carga eléctrica en función de los cambios en la tensión. La agregación de datos LTV puede realizarse de dos maneras: la primera denominada síntesis a partir de componentes de carga (síntesis basada en componentes) y la segunda denominada síntesis a partir de clases de clientes (síntesis basada en clientes) [7].

En el enfoque de síntesis basada en componentes, se modela el comportamiento de las cargas eléctricas en relación con la tensión. Para lograrlo, se emplea pruebas de laboratorio que permiten identificar este

comportamiento y encuestas que ayudan a determinar el nivel de uso de los dispositivos eléctricos [4]. El consumo total de energía puede calcularse con la expresión mostrada en la ecuación (2-21).

$$E_c(V) = \sum E_i(V) \cdot S_i \tag{2-21}$$

Donde:

- E_c : Consumo total de energía a nivel de circuito.
- E_i : Consumo de energía del aparato eléctrico del cliente i alimentado a una tensión V .
- S_i : Proporción de carga o coeficiente de participación del dispositivo eléctrico i .

La proporción de carga de un dispositivo eléctrico se refiere a su nivel de consumo energético dentro del consumo total de energía. De esta manera, el factor CVR puede estimarse al evaluar los consumos totales de energía en dos situaciones diferentes: CVR activada y CVR desactivada. El factor CVR se calcula empleando la ecuación (2-16).

En el enfoque de síntesis basada en clientes, se emplea una clasificación de los clientes. Así, se tiene clientes residenciales (R), comerciales (C) e industriales (I). La composición de la carga en un alimentador es diferente para cada tipo de cliente, así como también los efectos que tiene la aplicación de la técnica de CVR en dicho alimentador. Si bien los efectos cuantitativos pueden variar entre cada tipo de cliente, existe una conclusión general la cual nos dice que la mayor sensibilidad a la tensión la presentan los clientes residenciales, comerciales o una combinación de estos en comparación con los clientes de tipo industrial. Es decir, una reducción de la tensión de alimentación en el primer grupo de clientes produce un mayor efecto en cuanto al ahorro de energía. En la Tabla 2-2 se puede observar lo antes mencionado en aquellas referencias que presentan el factor CVR para los tres tipos de clientes. De igual manera, la Tabla 2-3 muestra un resumen de los factores CVR para los clientes de tipo residencial, comercial e industrial de diferentes estudios. Para estimar el valor del factor CVR se emplea la ecuación (2-22), la cual nos muestra como el factor CVR total de un alimentador se calcula por medio de una combinación lineal de los factores CVR y de los coeficientes de participación de los tres tipos de clientes antes mencionados [4][7].

Tabla 2-3 Factor CVR para diferentes tipos de clientes [4].

Id	Residencial	Comercial	Industrial
1	0.76	0.99	0.41
2	0.77	0.99	0.41
3	0.61	0.89	0.35
4	1.14	0.26	-
5	1.30	1.20	0.50
6	0.33-0.68	0.89-1.10	-
7	0.06-0.67	0.80-0.97	0.10
8	0.63	0.37	-
9	0.96-1.11	0.75-0.80	0.50-0.83

$$CVR_f = R \cdot CVR_{f,R} + C \cdot CVR_{f,C} + I \cdot CVR_{f,I} \tag{2-22}$$

Donde:

- R : Coeficiente de participación de la carga de los clientes de tipo residencial.
- C : Coeficiente de participación de la carga de los clientes de tipo comercial.
- I : Coeficiente de participación de la carga de los clientes de tipo industrial.
- $CVR_{f,R}$: Factor CVR de los clientes de tipo residencial.

- $CVR_{f,c}$: Factor CVR de los clientes de tipo comercial.
- $CVR_{f,i}$: Factor CVR de los clientes de tipo industrial.

2.6.4.1 Ventajas y Desventajas de los métodos basados en síntesis

Ventajas

- Los métodos basados en síntesis permiten obtener una estimación rápida de los efectos de la técnica de CVR en los alimentadores antes de su implementación en campo [4][7].

Desventajas

- En este método se asume ciertas consideraciones, como por ejemplo que la información relacionada a la composición de la carga en el alimentador es precisa y que la dependencia LTV de las cargas es la misma que la obtenida en los ensayos de laboratorio. Sin embargo, existe un alto grado de dificultad en determinar la sensibilidad LTV de todos los dispositivos eléctricos, así como también contar con información adecuada acerca de cómo está repartida la carga. Esto supone un desafío para calcular los coeficientes de participación de carga de los clientes, especialmente si el alimentador está compuesto por una mezcla de diferentes tipos de clientes [4][7].

2.6.5 Métodos basados en datos

Los métodos basados en datos permiten evaluar de manera efectiva los efectos de la técnica de CVR en las redes eléctricas modernas que poseen configuraciones complejas y que incluyen elementos basados en electrónica de potencia (PE, del inglés Power Electronics). Entre los métodos de cuantificación se encuentran los de aprendizaje profundo y los de aprendizaje automático [7]. Estas técnicas permiten enfrentar los problemas que tiene los métodos clásicos de evaluación, siendo estos desafíos los siguientes:

- Dificultad para encontrar dos alimentadores que estén correlacionados y que presenten patrones de consumo similares, puesto que se necesita de una gran precisión para no obtener resultados erróneos en cuanto al cálculo del factor CVR. Esto se convierte en un desafío mucho mayor cuando aumenta el número de alimentadores en los cuales se implementa la técnica de CVR, lo que hace que las técnicas convencionales de evaluación resulten ineficaces.
- Estimar el consumo de la carga cuando la técnica de CVR se encuentra inactiva es otro proceso que puede conllevar a cálculos imprecisos del factor CVR.
- Las inconsistencias de los datos representan otro gran problema para las técnicas de cuantificación convencionales. Esto debido a que pueden existir discrepancias en cuanto a los resultados obtenidos con datos reales capturados en campo y los obtenidos con los métodos clásicos.

De esta manera, se puede emplear los métodos basados en datos para evaluar de manera sencilla los efectos de la técnica de CVR en las aplicaciones de largo plazo y lidiar con los desafíos antes mencionados. Los resultados obtenidos con la aplicación de estas técnicas presentan una mayor precisión y exactitud. Además, estos métodos son capaces de afrontar las relaciones no lineales y complejas tanto de los modelos de carga empleados como de sus variables de influencia [7].

2.6.5.1 Métodos basados en aprendizaje automático

En el primer grupo se puede emplear diversos modelos, supervisados o no supervisados, para evaluar los efectos de la técnica de CVR, priorizando solucionar los problemas de las técnicas clásicas relacionados a los perfiles de datos y a la similitud de la carga. Entre los métodos basados en aprendizaje automático que se mencionan en la literatura para cuantificar los efectos de la técnica de CVR se incluyen máquinas de vectores de soporte (SVMs, del inglés Support Vector Machines), máquinas de potenciación de gradiente (GBMs, del inglés Gradient Boosting Machines) y k-medias [7].

Las SVMs son modelos que se emplean para análisis de regresión y clasificación, utilizando para ello algoritmos de aprendizaje relacionados. Estos modelos pueden utilizarse para evaluar los efectos de la implementación de la técnica de CVR en redes eléctricas basadas en PE que presenten estructuras complejas y no lineales. Para estimar los patrones de consumo y calcular el valor del factor CVR se emplea enfoques de

regresión basados en los modelos SVM. Concretamente, la estimación de los perfiles de carga se lo realiza con la técnica de CVR desactivada, empleando para ello SVM de múltiples etapas. En la Figura 2-23 se presenta la estructura del modelo SVM en tres etapas. La primera etapa consiste en seleccionar perfiles de consumo similares y calcular la potencia activa demandada con la técnica de CVR activada y desactivada. La segunda etapa consiste en entrenar el modelo empleando para ello los perfiles de carga seleccionados en la etapa anterior. Posteriormente, se estima los perfiles de carga con la técnica de CVR desactivada empleando los resultados de las pruebas. Para verificar la eficiencia del modelo, los resultados se comparan con una regresión multilineal utilizando un conjunto de datos históricos. Finalmente, si el modelo presenta un error menor al 0.8% se utiliza para calcular el valor del factor CVR [7].

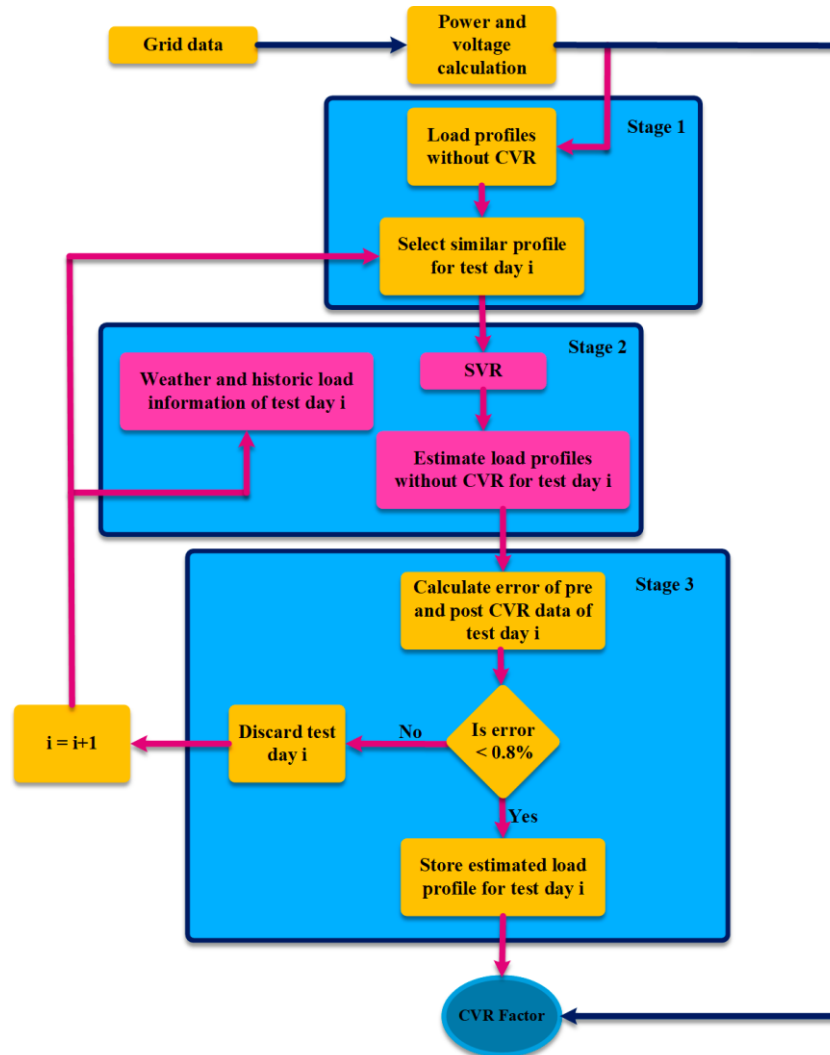


Figura 2-23. Estructura del modelo SVM para evaluar los efectos de la técnica de CVR [7].

GBM es otro modelo empleado para cuantificar los efectos de la técnica de CVR. Para ello, se estima el perfil de carga y se crea una línea base de la técnica de CVR (perfil de carga con CVR desactivada). Este modelo emplea técnicas basadas en similitud. No obstante, este modelo es más preciso debido a que la selección de los perfiles de carga se determina tomando en cuenta tanto la potencia de carga como la temperatura. La aplicación de este modelo a la red se lo realiza a través de dos etapas principales. La primera etapa involucra la selección de perfiles de carga que sean similares. Esto se logra mediante la utilización de datos previos y posteriores a la aplicación de la técnica CVR, extraídos de un historial de días de prueba específicos. La segunda etapa consiste en entrenar los modelos GBM iterativos bidireccionales empleando para ello los datos recopilados. El modelo termina una vez que todos los puntos de la línea base de la técnica de CVR se hayan generado. Finalmente, empleando las líneas base estimadas, se calcula el valor del factor CVR [7].

Otro modelo basado en aprendizaje automático para evaluar los efectos de la técnica de CVR es el denominado k-medias. Este es un modelo no supervisado, a diferencia de los modelos anteriores, que se emplea con el enfoque de identificar alimentadores correlacionados y similares entre sí. Se utiliza para

cuantificar los efectos de la técnica de CVR en redes eléctricas en las cuales esta técnica se implementa en múltiples alimentadores. Son dos etapas las que se emplean para la cuantificación de los efectos de la técnica de CVR. La primera etapa consiste en la elección aleatoria de los alimentadores de un conjunto grande. La segunda etapa consiste en la agrupación del total de los alimentadores al aplicar k-medias. Las agrupaciones se realizan en función de la ubicación y de los perfiles de carga. Finalmente, se calcula el valor del factor CVR para los diferentes conjuntos de alimentadores. En base a resultados obtenidos de simulaciones, el empleo del modelo de k-medias para cuantificar los efectos de la técnica de CVR reduce en gran medida la dificultad para calcular el factor CVR, obteniéndose de igual manera resultados más precisos [7].

No obstante, a pesar de que los métodos basados en aprendizaje automático son fáciles de implementar, estos dependen de las medidas utilizadas para cuantificar la similitud, como por ejemplo el clima o el tipo de carga, las cuales son medidas definidas por el operador, por lo cual se requiere realizar investigaciones más extensas en este campo para evaluar la precisión de estos métodos [7].

2.6.5.2 Métodos basados en aprendizaje profundo

En tanto que, al hablar de las técnicas basadas en aprendizaje profundo, en la literatura se menciona el uso de redes neuronales profundas para la evaluación de los efectos de la técnica de CVR. En particular, estas técnicas buscan restaurar y generar cual hubiera sido el comportamiento de la carga sin que la técnica de CVR este activada. Esto se realiza ya sea después o durante los periodos de tiempo que la técnica de CVR se encuentra habilitada. Los resultados obtenidos con este método muestran una mayor precisión y un menor error en la cuantificación de los efectos de la técnica de CVR en relación a los obtenidos con datos reales [7].

2.6.6 Datos requeridos para la evaluación del ahorro energético

Para determinar el ahorro energético de la implementación de la técnica de CVR en las redes de distribución, dependiendo del método empleado, se requiere varios datos. Esos datos deben de registrarse dentro de un periodo de tiempo adecuado, por ejemplo, entre 1 a 60 minutos [9]. Así, los datos que habitualmente se emplean en los métodos analizados incluyen:

- Datos de series temporales de la potencia activa, potencia reactiva, tensión y corriente provenientes del Sistema de Control y Adquisición de Datos SCADA de cada dispositivo regulador de tensión en la subestación o alimentador en el que se implementa la técnica de CVR.
- Energía y tensión específica en cada punto de conexión de los consumidores.
- Información relacionada a las características del alimentador, tal como la longitud del alimentador, carga nominal, factor de carga, composición de carga y tipo de cliente.
- Datos climáticos de la subestación, en los cuales deben estar incluidos la temperatura y la humedad.
- Estado de la técnica CVR (encendido/apagado) en cada intervalo de tiempo.
- Registrar de manera precisa la fecha de los datos recopilados.

2.7 Implementación y Rentabilidad de la técnica de CVR

La tecnología existente que se emplea tanto para la automatización de distribución, como para el control de tensión/potencia reactiva (control volt/var o VVC, del inglés Volt/VAR Control), y en los programas de Gestión del Lado de la Demanda (DSM, del inglés Distribution Management System) es adoptada para su utilización en la técnica de CVR [3]. Así, dentro de los equipos necesarios requeridos para llevar a cabo la implementación de la técnica de CVR se encuentran:

- Sistema SCADA y sistema de almacenamiento de datos.
- OLTC de la subestación y/o regulador de tensión en el alimentador, los cuales mediante un sistema de control cuentan con la capacidad de reducir la tensión de manera remota. Es decir, contar con un dispositivo electrónico inteligente IED y un módulo controlador de tensión.
- Sistema de control remoto de los reguladores de tensión.
- Dispositivos en campo con capacidad de comunicación.

Así, la implementación de la técnica de CVR en el sistema de distribución resulta económica, dado que la mayoría de los equipos necesarios ya se encuentran presentes en las infraestructuras de distribución modernas. Esto implica una inversión de capital relativamente baja para su puesta en funcionamiento [3].

En el sistema de distribución eléctrica, existen diversas maneras de regular la tensión y mantenerla dentro de los límites adecuados. Puesto que el objetivo de la técnica de CVR es reducir la tensión de la red y mantenerla dentro del rango aceptado, se pueden clasificar las técnicas empleadas para lograr dichos objetivos en dos grupos [4]. El primer grupo consiste en técnicas de bucle abierto sin retroalimentación de tensión. En este grupo se encuentran:

- OLTC
- LDC
- Reducción de dispersión de tensión (VSR, del inglés Voltage Spread Reduction)
- Reducción basada en capacitores
- Reducción de tensión a nivel doméstico (HVR, del inglés Home Voltage Reduction)

En tanto que el segundo grupo hace referencia a la utilización de los sistemas VVC de bucle cerrado, cuya implementación ha sido posible gracias a la utilización de los sistemas SCADA, a las infraestructuras de medición avanzada (AMI, del inglés Advanced Metering Infrastructure) y a los sistemas de gestión distribuida con capacidades avanzadas. Es decir, la técnica de CVR forma parte del VVC, siendo uno de sus modos de operación, ya que este control incluye otros objetivos como por ejemplo la mejora del factor de potencia, reducir pérdidas y minimizar la desviación de la tensión en la red [4].

2.7.1 Dispositivos de bucle abierto para regular la tensión

Los métodos más empleados para reducir la tensión en la red de distribución son los OLTC y los LDC presentes en los reguladores de tensión. En la Figura 2-24 se muestra la imagen de un OLTC en una subestación, en tanto que, en la Figura 2-25 se muestra un regulador de tensión que incluye el LDC.



Figura 2-24. OLTC [22].



Figura 2-25. Regulador de Tensión que incluye el LDC [23].

La utilización de los OLTC por lo general no supone un costo adicional, puesto que están presentes en la mayoría de subestaciones, permitiendo controlar la tensión secundaria de la subestación. No obstante, es necesario realizar una elección cuidadosa de los circuitos en los cuales se aplica la reducción de tensión al emplear los OLTC, ya que en algunos casos dicha reducción puede verse limitada por las grandes caídas de tensión a lo largo de los alimentadores. En cuanto a los LDC, su puesta en marcha se logra configurando los reguladores de tensión de tal manera que se garantice que en el punto más alejado de la red el nivel de tensión se mantenga en el valor mínimo aceptable. Es relevante destacar que los niveles de tensión a lo largo del alimentador varían según las condiciones de carga. El empleo de esta técnica permite reducir la tensión promedio entre un 2% y 3%. Si bien los LDC permiten controlar la tensión de la red de una manera simple, su uso presenta algunas complicaciones. Determinar la configuración de los LDC resulta complicado y no es flexible para adecuarse a las variaciones en las cargas y a los cambios en la configuración del sistema. Además, las empresas distribuidoras siempre operan a un nivel de tensión superior al límite inferior de tensión, dejando un margen de seguridad para garantizar que el nivel de tensión de todos los usuarios se encuentre siempre dentro del rango normal de funcionamiento, por lo que los efectos de la técnica de CVR se ven reducidos [4].

La técnica VSR implica la reducción de los límites de tensión a valores con un cambio porcentual menor; por ejemplo, se pasa de un rango de $\pm 5\%$ a un rango de $\pm 2.5\%$. Este ajuste se logra mediante el uso de reguladores de tensión u OLTC. Sin embargo, su implementación generalmente requiere modificaciones en el sistema, como equilibrar la carga, la incorporación de capacitores o el reemplazo de conductores en la red [24].

En relación a los capacitores, estos desempeñan un papel fundamental al proporcionar compensación de potencia reactiva en aplicaciones de CVR. Es importante destacar que se puede coordinar la operación de los bancos de capacitores conmutados junto con otros sistemas de control de tensión para implementar tanto VVC como CVR. En el contexto de un alimentador, los beneficios en términos de ahorro energético derivados de la técnica de CVR dependen en gran medida de la magnitud de la reducción de tensión. Sin embargo, esta reducción se ve limitada por las considerables caídas de tensión en ciertos circuitos. Al ubicar estratégicamente capacitores a lo largo del alimentador, se puede nivelar el perfil de tensión, corregir el factor de potencia y reducir las pérdidas, lo que facilita una implementación eficiente de la técnica de CVR. Adicionalmente, mediante el uso de capacitores, es posible lograr una disminución del 1% en la tensión en los alimentadores que carecen de reguladores de tensión u OLTC [4]. En la Figura 2-26 se muestra un banco de capacitores instalado en una red de distribución.



Figura 2-26. Banco de Capacitores en una red de distribución [25].

La reducción de tensión a nivel doméstico, conocida como HVR, implica la regulación de la tensión directamente en el medidor del cliente. Para llevar a cabo esta implementación, se requiere la instalación de un dispositivo en el medidor del cliente, el cual permite ajustar la magnitud de la tensión dentro de las instalaciones del cliente a un nivel inferior. A modo de ejemplo, en [4] se menciona una investigación que arrojó resultados en los que la implementación de la HVR logró una reducción de la tensión en un rango que osciló entre el 3.5% y el 5.2%. No obstante, esta técnica no se utiliza ampliamente debido a una serie de desventajas. Entre los inconvenientes más importantes de la HVR se encuentra que tanto la instalación como su costo asociado dependen del cliente.

A pesar de que las técnicas mencionadas anteriormente son eficientes y rentables para llevar a cabo la implementación de la técnica de CVR, presentan tres inconvenientes principales [4]:

- Existen limitaciones en cuanto a la magnitud de la reducción de la tensión.
- No existe optimización de los sistemas de control de los dispositivos o no está integrado de manera óptima a nivel de sistema. El control de los dispositivos depende de datos locales y operan de manera independiente.
- Incapacidad para adaptarse a los cambios dinámicos de las redes de distribución.

En términos generales, existen diversos dispositivos utilizados para la regulación de tensión en las redes de distribución que no dependen de una retroalimentación de tensión. Estos dispositivos permiten la implementación de la técnica de CVR. Sin embargo, a pesar de su amplia utilización en los sistemas de distribución, estos métodos de regulación de tensión presentan desafíos significativos al integrarlos con la técnica de CVR.

2.7.2 VVC de bucle cerrado

Como se mencionó anteriormente, la técnica de CVR es uno de los modos de operación del VVC de bucle cerrado. De manera general, el VVC implica tomar las medidas más adecuadas de control de tensión/potencia reactiva en intervalos de tiempo específicos utilizando para ello distintas mediciones. En la literatura existe mucha información en cuanto al VVC y a los diferentes algoritmos de implementación disponibles [4].

Numerosas empresas distribuidoras utilizan el VVC en el modo de operación CVR, y se han realizado diferentes estudios en donde se implementa la técnica de CVR a través de sistemas como SCADA y AMI. El

despliegue del sistema AMI amplía la capacidad de medir y modelar los sistemas para incluir a todos los clientes. De esta manera, AMI permite mejorar el funcionamiento de la red de distribución, logrando una optimización más precisa de la tensión, dejando cierto margen para la reducción de la misma. Esto, a su vez, permite un mayor ahorro energético de la técnica de CVR [4].

La utilización de los sistemas VVC de bucle cerrado presenta ventajas en relación a la utilización de los OLTC y LDC. Así, se tiene una reducción óptima de la tensión a nivel de sistema, mayores ahorros de energía y capacidad de adaptarse a los cambios dinámicos de las redes de distribución. Como desventaja se tienen la complejidad y los elevados costos que tiene su implementación. Por lo tanto, la elección de la técnica para la implementación de la técnica de CVR depende de la infraestructura existente en el sistema, la disponibilidad de los equipos y de los recursos financieros disponibles [4].

2.7.3 Rentabilidad

Con la implementación de la técnica de CVR, un ahorro significativo en cuanto a energía y sus costos se ha informado en la industria. Este ahorro energético puede ser clasificado desde moderado a significativo. A manera de ejemplo, en [3] se presenta un resumen corto de diferentes referencias en cuanto al ahorro producido con la implementación de la técnica de CVR. Así:

- La compañía Palmetto Electric Coop reportó ahorros de hasta 1.4 millones de dólares, lo que representa alrededor de un 0.9% de sus ingresos brutos. El ahorro en cuanto a energía por medio de la implementación de la técnica de CVR fue de 3.3% (año 2013).
- La compañía Idaho Power reportó un ahorro entre el 0.9% y el 1.8% para un cliente típico (consumo de 1000 kWh/mes, año 2013).
- Estudios realizados para la compañía Dominion Virginia Power estimaron un ahorro promedio del 2.8% de la energía anual (año 2012).
- Un estudio realizado por el Laboratorio Nacional del Noroeste del Pacífico en el año 2010 estima una reducción del 3.04% de la energía total consumida en Estados Unidos si en el 100% de sus alimentadores se implementa la técnica de CVR. Además, dicha reducción será únicamente del 2.4% en caso de que se implemente la técnica de CVR en el 40% de sus alimentadores.

2.8 Beneficios CVR

Existen muchos beneficios asociados a las técnicas CVR en los sistemas de distribución. Así, la implementación de la técnica de CVR puede beneficiar tanto a los consumidores como a las empresas distribuidoras de electricidad. Para el primer grupo, el beneficio viene de la disminución del consumo de energía, lo que significa una disminución en la factura de electricidad; en tanto que, para el segundo grupo, los beneficios se producen tanto en aspectos económicos como operacionales, ya que, al reducir la demanda de energía de la red al reducir la tensión de alimentación, se disminuyen las pérdidas netas tanto en las líneas de distribución como en los transformadores; se produce un alivio en cuanto a la potencia máxima demandada en la red eléctrica, lo que implica una reducción en la probabilidad de interrupciones de suministro durante estos periodos y una reducción de los costes operacionales asociados; existe una disminución de las emisiones de gases contaminantes, así como también permite cumplir con ciertos requerimientos y alcanzar ciertos incentivos promovidos por las agencias reguladoras [2][18]. Además, se pueden producir mejoras en el sistema al integrar la técnica de CVR con otras técnicas para obtener un control VVC óptimo, que es la dirección hacia la cual se encamina los programas futuros destinados a mejorar la eficiencia en la distribución eléctrica [4].

3 CVR EN SISTEMAS ELÉCTRICOS MODERNOS

En este capítulo se detalla las aplicaciones, técnicas de implementación y métodos de cuantificación de los efectos de la técnica de CVR en los sistemas eléctricos modernos. Además, se presenta las perspectivas futuras relacionadas a la temática CVR.

3.1 Aplicaciones CVR en sistemas eléctricos modernos

Para garantizar el funcionamiento adecuado de una red eléctrica, es fundamental asegurar la estabilidad del sistema en los diversos períodos de operación, ya sea en estado estacionario, dinámico o durante las fallas transitorias. Esto se consigue mediante el equilibrio entre la energía producida por los generadores y la energía consumida por las cargas. En las redes eléctricas modernas que incorporan elementos basados en electrónica de potencia (PE), al hablar del estado dinámico, dicho equilibrio debe alcanzarse en cortos periodos de tiempo (pocos segundos). Lo anterior representa una gran complejidad para los sistemas modernos basados en PE que incluyen unidades de generación distribuida con interfaz de inversor (IIDG, del inglés Inverter-Interfaced Distributed Generation) cuando se trata de alcanzar la estabilidad. Esto se debe a las diversas escalas de tiempo utilizadas en los sistemas de control de los inversores. Además, la marcada presencia de fuentes de energía renovable variable (RES, del inglés Renewable Energy Sources) contribuye a aumentar la incertidumbre de la red, lo que significa que alcanzar la estabilidad se convierta en un proceso más complejo y costoso [7].

Un factor que ejerce una influencia significativa en la estabilidad de la red y, por lo tanto, en su funcionamiento, es la capacidad del sistema para suministrar la potencia activa y reactiva requerida por la carga en los periodos de tiempo adecuados. Esto también ofrece otra aplicación de la técnica CVR. Tradicionalmente, la técnica de CVR es un método de conservación de energía cuyo principio consiste en la reducción de la tensión de alimentación de la carga para disminuir el consumo de energía activa y reactiva [26]. Sin embargo, esta técnica puede aplicarse de igual manera como una estrategia adicional o alternativa para mejorar la estabilidad dinámica del sistema. En este sentido, es posible controlar de manera dinámica la tensión en la banda inferior del rango permitido, lo que, a su vez, permite gestionar la potencia activa y reactiva demandada por los clientes. Esto implica que se puede alcanzar un equilibrio entre la generación y la demanda en un estado dinámico, contribuyendo así a mejorar la estabilidad del sistema. Esta capacidad es viable gracias a la rápida respuesta de los IIDGs, siempre y cuando la técnica de CVR disponga de un apropiado esquema de control [7].

Dentro del grupo de redes modernas basadas en PE que han suscitado un gran interés en tiempos recientes se encuentran las microrredes (MG por sus siglas en inglés). Esto se debe a su excelente rendimiento y confiabilidad en la incorporación de IIDG. Dentro de esta categoría se incluyen las RES, los sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS, del inglés Battery Energy Storage Systems) y las cargas

inteligentes (SL, del inglés Smart Loads) [7]. Las SL son dispositivos que tienen la capacidad de supervisar y ajustar su consumo de energía en respuesta a la calidad de la energía de la red eléctrica. Incluso pueden ser controladas de manera remota [27].

Para lograr una integración efectiva entre la red con los recursos energéticos distribuidos (DER, del inglés Distributed Energy Resources), BESS y SL es fundamental contar con equipos basados en PE. No obstante, surge un problema relacionado con la proliferación de interfaces basadas en electrónica de potencia en las redes modernas, que, sumado a la falta de inercia física conducen a redes de baja inercia. Esto puede provocar problemas en la red, como variaciones críticas en la frecuencia de la red e inestabilidades dinámicas agudas. En este contexto, otra aplicación clave de la implementación de la técnica de CVR es su contribución a la estabilidad de la frecuencia en sistemas que incorporan MGs con elevada presencia de IIDG. Esta contribución implica proporcionar la inercia requerida y a continuación, abordar las inestabilidades tanto dinámicas como transitorias. Esto conduce a una mejora en la resistencia de la red, lo que permite prevenir variaciones significativas en la frecuencia. Como resultado se logra un mejor control y flexibilidad de las micro fuentes de energía [7]. Es posible clasificar las aplicaciones de la técnica de CVR en redes eléctricas modernas según escalas de tiempo, como se presenta a continuación:

- De segundos a minutos: Soporte de frecuencia y síntesis de inercia.
- De minutos a horas: Disminución de la demanda pico.
- De horas a meses/años: Ahorro energético.

Además, la Figura 3-1 permite visualizar de mejor manera la clasificación en escalas de tiempo de las diferentes aplicaciones de la técnica de CVR.

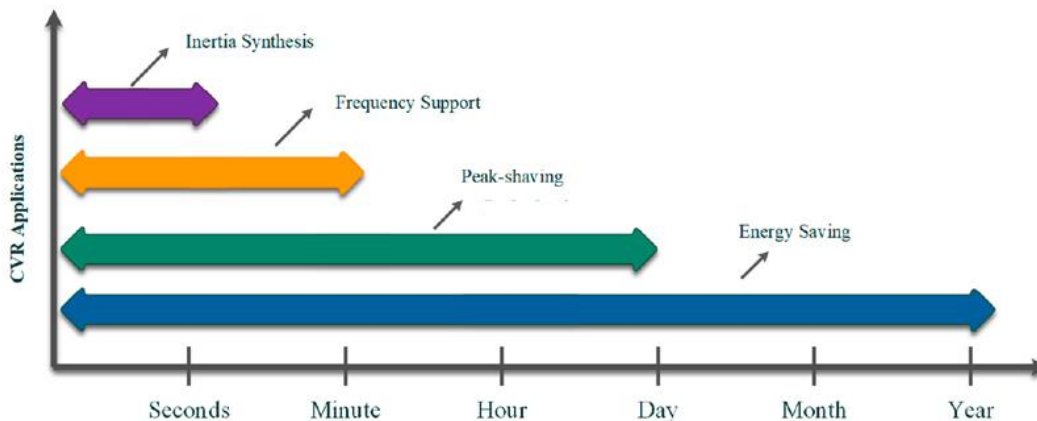


Figura 3-1. Clasificación de las aplicaciones de la técnica de CVR en sistemas eléctricos modernos según escalas de tiempo [7].

La clasificación de las aplicaciones en función de escalas de tiempo permite tener un nuevo enfoque para identificar los efectos de la técnica de CVR en los sistemas modernos basados en PE, lo que a su vez conlleva a la elección adecuada de las técnicas de implementación y de los métodos de cuantificación de sus efectos. Así, la técnica de CVR se utiliza en las redes modernas en diferentes aplicaciones para tratar temas tanto económicos como de estabilidad [7].

3.1.1 Ahorro Energético y Disminución de la demanda pico

Como se menciona en el capítulo 2, la técnica de CVR se puede utilizar en los sistemas para ahorrar energía y reducir la demanda pico en la red eléctrica, siendo una opción factible en términos económicos. El ahorro de energía se logra al reducir la tensión, lo que a su vez disminuye el consumo de potencia activa y reactiva. Aunque no todas las cargas conectadas a la red generan un ahorro de energía al reducir la tensión, en general, la suma de todas las cargas conectadas al alimentador produce un ahorro de energía significativo. Si bien esta aplicación de la técnica de CVR es sencilla, los resultados obtenidos dependen de una variedad de factores, siendo los principales la naturaleza de la carga y la configuración del sistema. Es por esta razón que la aplicación de la técnica de CVR por parte de las empresas de servicios eléctricos ha producido resultados mixtos [26]. En cuanto a la disminución de la demanda pico, esta es aplicada durante horas específicas a lo

largo del día con el objetivo de disminuir la demanda máxima de energía en ese momento [4]. Reducir la tensión y la demanda de energía durante estos períodos de tiempo permite a las empresas de servicios eléctricos posponer mejoras en la capacidad de su sistema o incluso considerar la eliminación de estas expansiones por completo [28].

En las redes eléctricas modernas, la integración de DER en los sistemas eléctricos ha tenido un crecimiento notable. Estos recursos influyen en la calidad de la energía, los perfiles de tensión, la eficiencia energética y la confiabilidad de los sistemas de distribución. En lo que respecta a las aplicaciones convencionales de la técnica de CVR, tanto el ahorro de energía como la reducción de la demanda en las horas pico, son enfoques que pueden implementarse en las redes eléctricas modernas. De esta manera, en el lado de generación, se produce un incremento de la eficiencia energética con la integración de la generación distribuida, en tanto que, en el lado de la demanda, se consigue un ahorro energético gracias a la aplicación de la técnica de CVR [29].

Para lograr lo anterior, es necesario diseñar e instalar sistemas de generación distribuida de manera que la tensión se mantenga dentro de los límites operativos permitidos (banda inferior de los límites de tensión), lo que a su vez conduce a la reducción de la potencia demandada por los usuarios finales. La combinación de sistemas de generación distribuida y BESS, junto con la implementación de la técnica de CVR, resulta en un sistema más eficiente y funcional, especialmente en situaciones de aumento en la demanda eléctrica. Así, se logra una reducción en el consumo de energía y alivio de la potencia requerida en las horas de mayor demanda [7].

Aunque los beneficios de la técnica de CVR son evidentes, surgen ciertos inconvenientes relacionados con su implementación en la red eléctrica, específicamente en lo que respecta a la calidad de la energía. Estos inconvenientes incluyen problemas de parpadeo que pueden afectar a los equipos conectados a la red debido a la reducción de la tensión, así como la inestabilidad en la red causada por la subtensión. No obstante, varios estudios han demostrado que la aplicación de la técnica de CVR en la red eléctrica tiene un impacto mínimo en términos de problemas de subtensión y es poco frecuente que ocasione problemas graves [7].

3.1.2 Soporte de frecuencia y síntesis de inercia.

Los avances alcanzados en materia de la electrónica de potencia han permitido que los IIDGs se integren a los sistemas eléctricos. No obstante, esta integración ha planteado nuevos desafíos relacionados con el control y la estabilidad de dichos sistemas. La creciente presencia de RES en las redes eléctricas modernas ha generado problemas de gestión y control. Como respuesta a estas problemáticas, ha surgido el concepto de MG para abordar estos desafíos [7].

Una MG es una red compacta, la cual incluye DER y cargas locales. Las MG han suscitado un gran interés debido a la integración de RES [30]. Además, una MG tiene la capacidad de operar conectada a la red u operar en forma aislada [31]. Entre los componentes que conforman una MG se encuentran [30]:

- Dispositivos de producción de energía renovable
- Cargas
- BESS
- Equipos auxiliares como convertidores y controladores de energía

Los sistemas eléctricos convencionales están conformados por múltiples generadores síncronos. Estos generadores tienen una gran inercia rotacional, lo que permite mantener la estabilidad de frecuencia de la red al absorber o liberar energía [32]. En tanto que, en las redes eléctricas que incorporan PE, existen problemas importantes, estando entre ellos la inestabilidad transitoria y dinámica, así como las grandes variaciones en la frecuencia ocasionadas por la falta de inercia en la red. Esto se debe fundamentalmente a la carencia de masa rotatoria en dichas redes. La inercia juega un papel fundamental en mantener la estabilidad en la red y en atenuar las respuestas tanto dinámicas como transitorias, por lo que su carencia tiene un efecto directo en la frecuencia mínima a la que llega la red, también llamado nadir y en el denominado RoCoF, el cual es la tasa de cambio de frecuencia [7]. La ecuación (3-1) muestra la ecuación del RoCoF.

$$RoCoF = \frac{df}{dt} \approx \frac{1}{Inercia} \propto \frac{1}{H} \quad (3-1)$$

Donde:

- H : Constante de inercia.

La utilización de la técnica de CVR en redes basadas en PE puede ser una alternativa de solución para los problemas antes descritos, tanto para la síntesis de inercia como para el soporte de frecuencia. De esta manera su implementación contribuye a mejorar la estabilidad de la red. En la Figura 3-2 se ilustra esta aplicación. Se observa claramente la diferencia que existe entre el sistema que tiene implementado la técnica de CVR (línea amarilla) con respecto al que no la tiene (línea azul). Así, con la incorporación de la técnica de CVR se logra la reducción del nivel de tensión de la red de distribución, con lo cual posteriormente se consigue regular la demanda, permitiendo de esta manera equilibrar de manera instantánea la energía generada y la potencia activa/reactiva demandada por las cargas, lo que supone un aumento en la inercia del sistema gracias a la técnica de CVR [7].

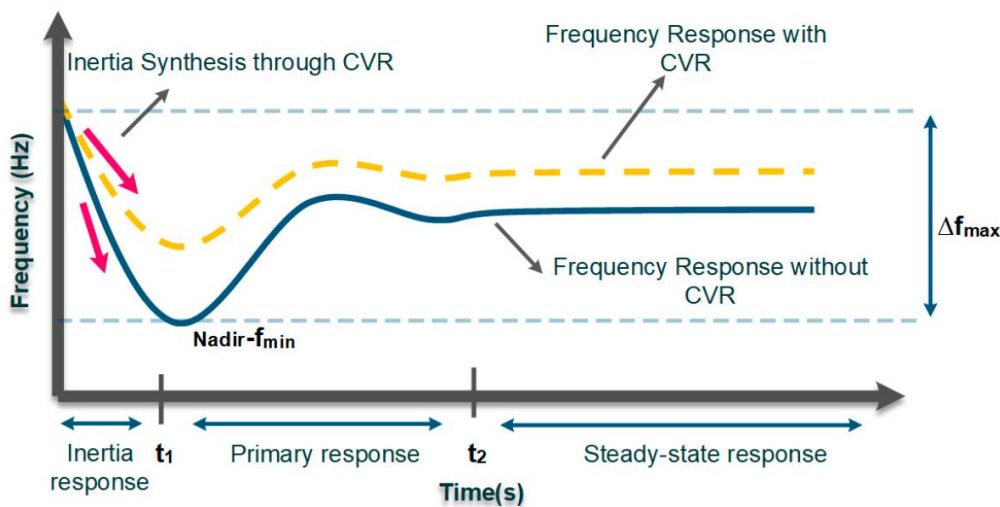


Figura 3-2. Soporte de frecuencia y síntesis de inercia a través de la técnica de CVR [7].

Un ejemplo del uso de la técnica de CVR para mejorar la respuesta primaria de frecuencia en una MG se describe en [33]. El método consiste básicamente en activar los reguladores de tensión automáticos (AVR, del inglés Automatic Voltage Regulator) de los generadores de diésel durante las operaciones de conmutación para brindar apoyo a las MG que están interconectadas. De esta manera, la técnica de CVR permite el ajuste del nivel de tensión durante un transitorio empleando los AVR de los generadores. En condiciones normales, el AVR ajusta la excitación del campo de los generadores para mantener la tensión de salida igual a un valor de referencia. En el método propuesto, también se incorpora un valor de referencia de frecuencia para regular la tensión en los terminales. Por lo tanto, cuando la frecuencia medida es inferior al valor de referencia, la tensión de salida se reduce con el fin de disminuir la demanda de carga. La reducción de la carga a su vez resulta en una disminución del par eléctrico en las máquinas rotatorias.

De igual manera, las SL han generado un gran interés para la regulación de la inercia a través de la técnica de CVR en redes que incluyen inversores, esto debido al rápido tiempo de respuesta de estos últimos. De este modo, la combinación de las SL con la implementación de la técnica de CVR permite mejorar la estabilidad dinámica y transitoria de la red, ocasionado un aumento en la inercia del sistema, la consiguiente reducción del RoCoF y una reducción en las fluctuaciones máximas de frecuencia del sistema. Por otra parte, los resultados de una investigación experimental demostraron las capacidades de la técnica de CVR para la síntesis de inercia como para el soporte de frecuencia. En dicha investigación, el RoCoF se redujo en un 40%, en tanto que la desviación máxima de frecuencia disminuyó un 18%. Vale la pena mencionar que la técnica de CVR también puede utilizarse en aplicaciones para mejorar la frecuencia en régimen permanente, aunque esta aplicación es poco frecuente dentro de la literatura [7].

3.2 Técnicas de implementación CVR en sistemas eléctricos modernos

La elección del método de implementación adecuado de la técnica de CVR en las redes eléctricas modernas

basadas en PE es fundamental. Estas técnicas difieren de las utilizadas en los sistemas tradicionales y deben seleccionarse en función de la aplicación final de la técnica de CVR. La configuración de la red es otro factor importante a considerar al igual que el modelo de carga empleado, ya que estos factores tienen una gran influencia en el funcionamiento de la técnica de CVR, por lo cual es fundamental la elección del método de implementación adecuado. De esta manera, para la correcta implementación de la técnica de CVR en redes basadas en PE se necesitan técnicas modernas que operen en conjunto con equipos avanzados, como por ejemplo las SL o los inversores inteligentes [7].

En el capítulo 2 se describieron los dos grupos que concentran las técnicas de implementación de CVR en los sistemas convencionales basados en generación síncrona, siendo estos las técnicas de bucle abierto sin retroalimentación de tensión y las técnicas de VVC con retroalimentación de tensión respectivamente. La aplicación de la técnica de CVR con estas técnicas está destinada a la reducción en el consumo de energía por parte de los clientes. Sin embargo, existen ciertas barreras y dificultades en cuanto a las técnicas tradicionales de implementación de CVR cuando son aplicadas en las redes modernas [7]. A continuación, se enumera tales desafíos:

- Para lograr una integración efectiva de los RES a la red eléctrica, es esencial disponer de equipos que puedan responder de manera ágil, como por ejemplo los convertidores basados en PE. Esto es especialmente importante cuando se trata de RES intermitentes, como es el caso de la energía eólica y fotovoltaica, ya que estas generan fluctuaciones rápidas y significativas en el suministro eléctrico. El problema radica en que las técnicas tradicionales para implementar la técnica de CVR son complicadas e ineficientes, debido a que no es posible una coordinación efectiva entre los convertidores basados en PE, los cuales tienen tiempos de respuesta rápidos, y los dispositivos electromecánicos empleados para regular la tensión (banco de capacitores, OLTC, reguladores de tensión), ya que estos tienen cierto retardo en su actuación.
- Existe un mayor número de operaciones de conmutación en los equipos empleados para la implementación de las técnicas tradicionales de CVR, particularmente en los bancos de capacitores. Esto debido al carácter variante de los RES, lo que ocasiona una disminución de la vida útil de los equipos, generando dificultades adicionales.
- Las técnicas tradicionales de implementación de CVR están orientadas a aplicaciones que operan a largo plazo, por lo que su utilización en las redes modernas, cuyos tiempos de actuación se encuentran en escalas de tiempo mucho más pequeñas (régimen dinámico), no son eficaces. De esta manera, se necesita disponer de equipos modernos que sean capaces de funcionar en estas condiciones, lo que permite la incorporación de técnicas modernas de implementación de CVR.

Por todo lo antes mencionado, se requiere emplear sistemas basados en PE para la implementación de la técnica de CVR en las redes modernas. Una división de las técnicas modernas de implementación se aprecia en la Figura 3-3.

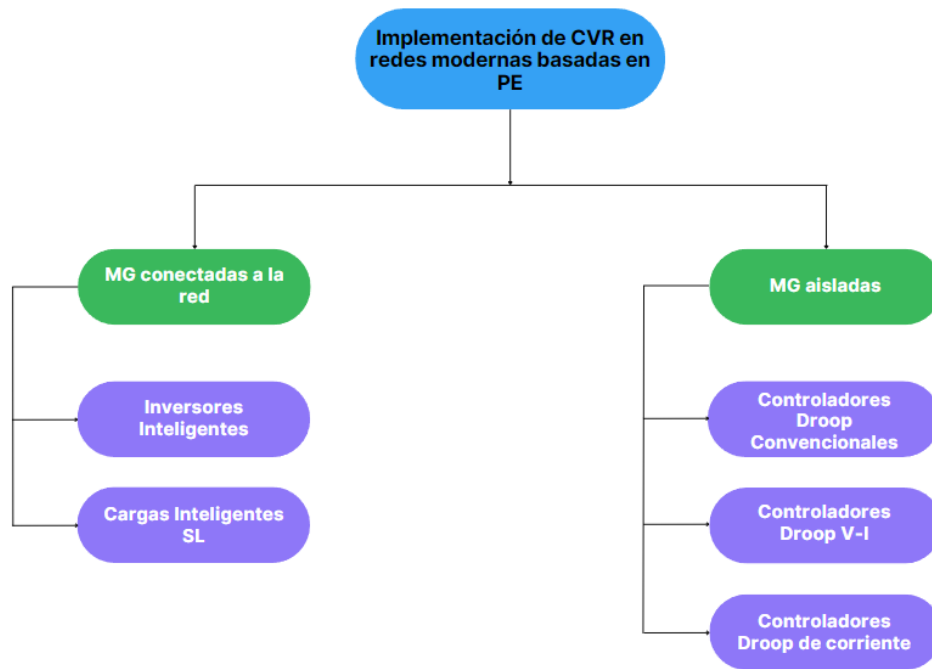


Figura 3-3. Clasificación de los métodos de implementación de CVR en redes modernas basadas en PE.

3.2.1 Implementación de CVR en redes modernas basadas en PE con MG conectadas a la red

Para la implementación de la técnica de CVR en redes modernas basadas en PE y con MG que se encuentran conectadas a la red, se emplean los inversores inteligentes y las cargas inteligentes SL. Estas técnicas innovadoras de implementación de CVR están basadas en las técnicas de optimización de tensión/potencia reactiva denominada VVO, y están diseñadas para funcionar en redes eléctricas modernas basadas en PE. Además, estas técnicas toman en consideración los efectos de las RES y de los IIDG [7].

3.2.1.1 Implementación de la técnica de CVR a través de inversores inteligentes

La interconexión a la red de distribución de sistemas solares fotovoltaicos y eólicos de pequeña y gran escala presenta un incremento significativo actualmente. La limitación en sus niveles de penetración se debe a los efectos negativos en cuanto a los parámetros operativos de la red, concretamente en lo relacionado al aumento de tensiones. Para disminuir estos efectos adversos en la tensión, las plantas fotovoltaicas y eólicas hacen uso de inversores inteligentes que tienen la capacidad de absorber o inyectar energía reactiva a la red [34].

Un inversor inteligente es un dispositivo que incorpora funcionalidades operativas adicionales además de las que vienen incluidas en un inversor tradicional. Están diseñados para operar en las redes modernas, permitiendo la integración de las DER, así como también de los BESS. Entre todas las aplicaciones de los inversores inteligentes en las redes modernas, se destaca la gestión de tensión/potencia reactiva (volt/var) y la gestión de tensión/potencia activa (volt/watt) para su uso en las aplicaciones CVR [7]. En la Figura 3-4 se observa las curvas características volt/var y volt/watt de los inversores inteligentes.

- Gestión tensión/potencia reactiva (volt/var): En este enfoque el inversor absorbe o inyecta potencia reactiva en función de la tensión en terminales y de la capacidad disponible de inyección/absorción de potencia reactiva. La curva volt/var es definida por la empresa de servicio eléctrico [34].
- Gestión tensión/potencia activa (volt/watt): De igual manera que el caso anterior, la empresa de servicio eléctrico es la encargada de definir las curvas volt/watt para el grupo de inversores. En este enfoque, la potencia activa a la salida del inversor se reduce en función de la tensión y de la curva volt/watt respectiva [34].

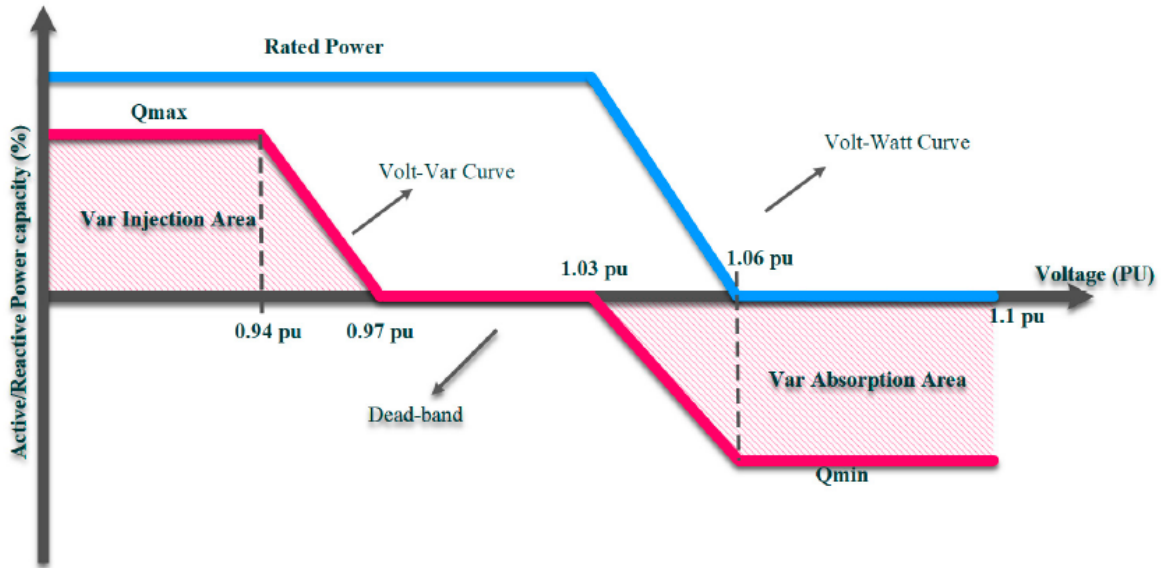


Figura 3-4. Curvas volt/var y volt/watt de los inversores inteligentes [7].

De esta manera, los inversores inteligentes pueden regular tanto la potencia activa como la potencia reactiva que se absorbe o se inyecta a la red a través de los IIDG, esto debido a su capacidad de regulación de tensión, siendo esta su aplicación principal. Así, es posible el empleo de la técnica de CVR por medio del uso de inversores inteligentes. En la Figura 3-5 se aprecia un ejemplo que integra el control volt/var con la técnica CVR. Los IIDG se emplean como una fuente de tensión, lo que permite regular la tensión y la frecuencia a la salida en función de a los valores medidos. El inversor inteligente permite implementar la técnica de CVR al actuar como una fuente de corriente, ajustando la tensión mediante la compensación de potencia reactiva. En función de la aplicación a la que se destina la técnica de la técnica de CVR, es posible ajustar las potencias demandadas en diferentes escalas de tiempo [7].

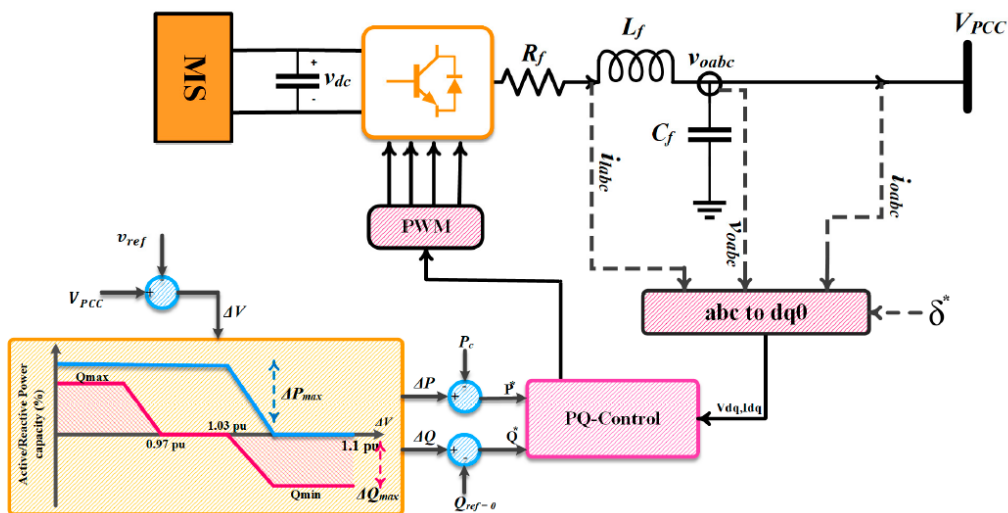


Figura 3-5. Inversor inteligente que integra el control volt/var y la técnica de CVR [7].

Otro aspecto a tener en cuenta es que se puede utilizar los inversores inteligentes a nivel residencial para modificar los requerimientos de energía activa y reactiva demandada por los usuarios, aunque esto depende de la configuración de la red. Además, es necesario contar enlaces de comunicación de gran ancho de banda para su empleo en la técnica de CVR. De esta manera, los inversores inteligentes son efectivos para su uso en las redes eléctricas modernas. La utilización de inversores inteligentes para la implementación de la técnica de CVR puede emplearse adicionalmente para aplicaciones convencionales relacionadas a mejorar la red. Estas mejoras están relacionadas a enfoques económicos, ya que la técnica de CVR posibilita regular la tensión mediante la modificación de la potencia reactiva, obteniéndose beneficios en cuanto a ahorros de energía. Esto permite integrar conjuntamente el control y la economía de las redes eléctricas modernas [7].

En resumen, se puede implementar la técnica de CVR en redes eléctricas modernas a través de inversores inteligentes para aplicaciones tanto de conservación de energía, como para aplicaciones de aumento de inercia y soporte de frecuencia primaria. No obstante, para su incorporación hay que tener en consideración la estabilidad de los inversores, especialmente cuando la red a la que se conectan presenta una alta impedancia (red débil) [7].

3.2.1.2 Implementación de la técnica de CVR a través de cargas inteligentes

Se puede clasificar las cargas eléctricas en dos grupos de acuerdo a su sensibilidad a la tensión de la red. El primer grupo se denomina cargas del tipo crítico, las cuales requieren un suministro eléctrico de alta calidad cuidadosamente regulado de manera constante. Por otro lado, el segundo grupo se conoce como cargas no críticas, las cuales presentan efectos muy pequeños o prácticamente nulos para el consumidor frente a ciertas variaciones en la tensión. Algunas de las cargas no críticas mantienen un consumo de energía constante, independientemente de la tensión de alimentación, mientras que en otras, el consumo de energía varía en función de la tensión de entrada. Dentro de este último grupo se incluyen calentadores, equipos de iluminación, motores pequeños sin problemas de bloqueo y todas aquellas cargas cuyo consumo de potencia varía de manera continua ante cambios en la tensión de alimentación. La combinación entre una carga no crítica dependiente de la tensión y un compensador de tensión conforman una carga inteligente o SL. Específicamente, el compensador de tensión debe estar conectado en serie, entre el punto de alimentación de la red eléctrica y la carga [35]. Las SL pueden clasificarse en función del tipo de compensador de tensión empleado. Así:

- *SL únicamente con compensación reactiva*

El compensador de tensión es un convertidor basado en PE con un enlace de corriente continua que inyecta una tensión en serie con la carga no crítica. La tensión inyectada tiene una magnitud controlable (V_{ES}) y un ángulo de fase (θ_{ES}). En este caso, el ángulo de fase se mantiene en cuadratura con el flujo de corriente, por lo cual no existe contribución de potencia activa por parte del compensador. A esta SL se le denomina SLQ y se observa en la Figura 3-6 (a). El consumo de potencia activa de la carga no crítica (P_{NC}) es igual al consumo de potencia activa de la SL (P_{SL}), despreciando las pérdidas en el convertidor. En tanto que, el consumo de potencia reactiva en la SL (Q_{SL}) es igual a la suma algebraica de los consumos de potencia reactiva de la carga no crítica (Q_{NC}) y del compensador (Q_{ES}). De esta manera, solo la magnitud de la tensión inyectada V_{ES} varía, manteniendo el ángulo de fase θ_{ES} a $\pm 90^\circ$. Con esta configuración, no es posible controlar simultáneamente la potencia activa y reactiva de la SL [35].

- *SL con compensación activa y reactiva*

Una mejora en cuanto al caso anterior se consigue mediante un compensador de tensión que permita controlar de manera independiente tanto la tensión inyectada como su ángulo de fase. De esta manera, se puede controlar el consumo tanto de potencia activa como de potencia reactiva de la carga, permitiendo así controlar tanto la tensión como la frecuencia. Para permitir el intercambio de potencia activa, se emplea un sistema de almacenamiento de energía o un convertidor B2B [35]. Si se emplea un sistema de almacenamiento de energía la SL se denomina SLES (Figura 3-6 b)); en tanto que, al emplear un convertidor B2B, a la SL se le denomina SLBC (Figura 3-6 c)).

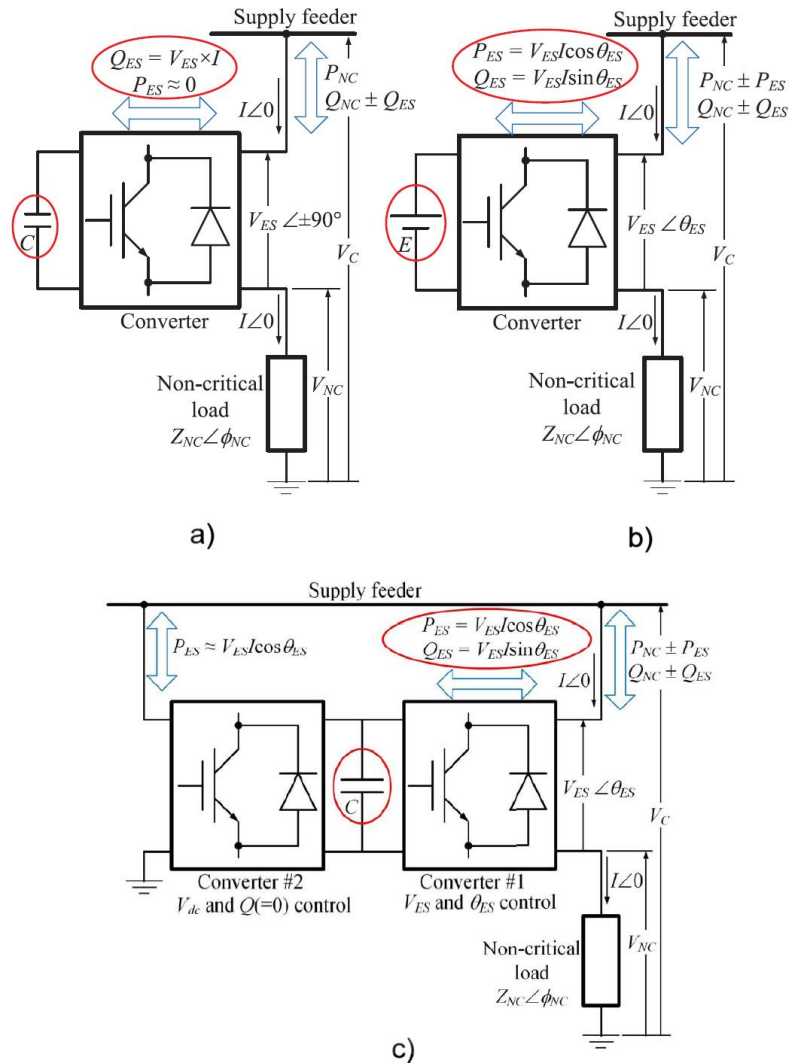


Figura 3-6. a) SLQ. b) SLES. c) SLBC [35].

Aplicaciones de síntesis de inercia y soporte de frecuencia son posibles mediante el uso de la técnica de CVR a través de las SL, esto gracias a sus características que les permiten regular la tensión y la correspondiente potencia activa y reactiva a la salida de las cargas. Esta capacidad de regulación se utiliza en cargas a gran escala en las redes modernas, en donde se emplean las SL junto con la técnica de CVR para gestionar el consumo energético de las cargas y de esta manera optimizar la capacidad de respuesta transitoria y dinámica de la red, mejorando de este modo la estabilidad del sistema [7].

3.2.2 Implementación de la técnica de CVR en redes modernas basadas en PE con MG aisladas

En microrredes de pequeña escala basadas en PE, para la implementación de la técnica de CVR, se emplea los controladores droop. Se puede utilizar diferentes esquemas droop, ya sean convencionales, modificados o adaptativos para la regulación de la frecuencia y de la tensión, así como también para llevar a cabo el reparto de energía activa y reactiva entre los diversos IIDG. Además, en las MG para implementar la técnica de CVR apoyada en los controladores droop, se emplea controles de tensión y potencia avanzados, con lo cual se consigue una mejora de la estabilidad dinámica del sistema. Para lograr esto último se emplea técnicas de soporte de frecuencia [7].

3.2.2.1 Implementación de la técnica de CVR a través de controladores droop convencionales

Los controladores droop funcionan de manera efectiva en sistemas eléctricos convencionales por lo cual se emplean en las MG para el reparto de potencia entre los diversos IIDG. Existen dos bucles de control droop,

frecuencia-potencia activa (bucle de control P-f) y tensión-potencia reactiva (bucle de control Q-V). El bucle de control droop P-f es el encargado de distribuir la potencia que demanda la carga entre las diferentes DER, esto en función de su capacidad. El bucle de control Q-V se emplea para evitar la circulación de corriente entre las DER por medio de la regulación de tensión. Este sistema de control es simple, eficiente y descentralizado que no requiere de una red de comunicaciones [36].

En las ecuaciones (3-2) y (3-3) se aprecian las relaciones P-f y Q-V respectivamente. Además, en la Figura 3-7 se presenta las curvas droop convencionales.

$$\omega = \omega_n - K_p P \quad (3-2)$$

Donde:

- ω : Frecuencia operacional
- ω_n : Frecuencia nominal
- K_p : Coeficiente droop P-f
- P : Potencia activa a la salida de los inversores.

$$V = V_n - K_Q Q \quad (3-3)$$

Donde:

- V : Tensión operacional
- V_n : Tensión nominal
- K_Q : Coeficiente droop Q-V
- Q : Potencia reactiva a la salida de los inversores.

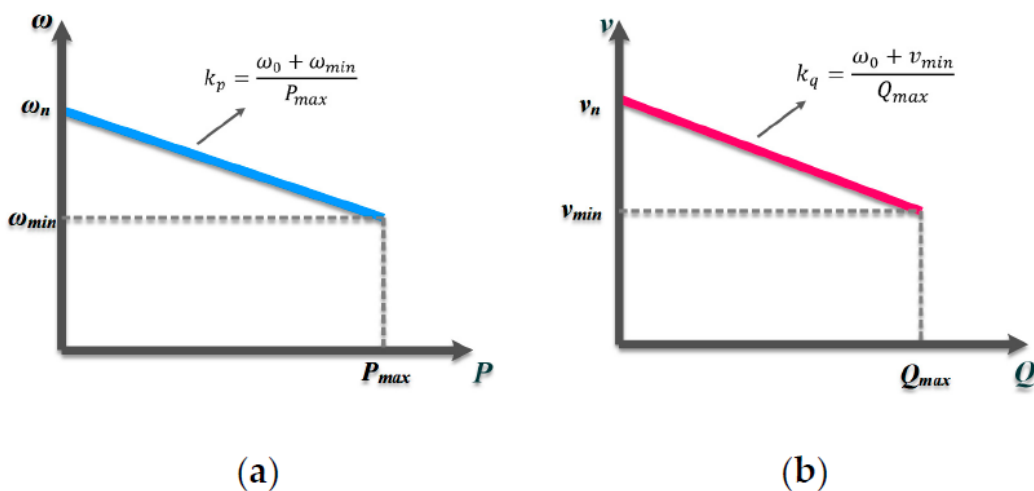


Figura 3-7. Curvas droop convencionales. (a) Curva P-f. (b) Curva Q-V [7].

En [37] se presenta un ejemplo de uso de la técnica de CVR mediante controladores droop convencionales. En este estudio, la técnica de CVR se pone en funcionamiento únicamente cuando existen condiciones de sobrecarga o a las horas de máxima demanda. En la Figura 3-8 se aprecia las curvas droop convencionales durante condiciones normales y de sobrecarga.

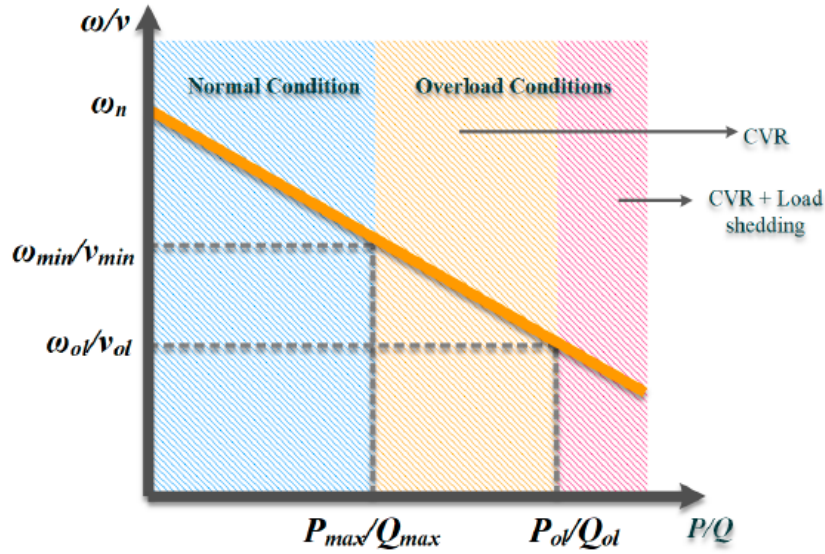


Figura 3-8. Curvas droop convencionales durante condiciones normales y de sobrecarga [7].

Así, se activa la técnica de CVR una vez que se han superado los umbrales establecidos para la tensión (V_{min}) y para la frecuencia (ω_{min}). Esto es posible gracias a que los controladores droop miden de manera instantánea la tensión y frecuencia empleando las regiones definidas en las curvas droop [7]. Puesto que la técnica de CVR debe activarse al producirse una condición de sobrecarga tanto en la potencia activa como reactiva, es necesario calcular estos desajustes, para lo cual se emplea las siguientes expresiones:

$$\Delta P = P_{ol} - P_{max} \quad (3-4)$$

$$\Delta Q = Q_{ol} - Q_{max} \quad (3-5)$$

$$\Delta S = \sqrt{\Delta P^2 + \Delta Q^2} \quad (3-6)$$

Donde:

- ΔP : Desajuste en la potencia activa
- P_{ol} : Potencia activa durante la condición de sobrecarga
- P_{max} : Potencia activa máxima
- ΔQ : Desajuste en la potencia reactiva
- Q_{ol} : Potencia reactiva durante la condición de sobrecarga
- Q_{max} : Potencia reactiva máxima
- ΔS : Desajuste en la potencia aparente

Una vez calculado el desajuste en la potencia aparente ΔS , se calcula la reducción en la tensión del inversor requerida para el cambio en la potencia aparente durante la aplicación de la técnica de CVR [37]. Para ello, se emplea la siguiente expresión:

$$\Delta V = 0.5 * \frac{\Delta S}{V_{od}} \quad (3-7)$$

Donde:

- ΔV : Reducción en la tensión del inversor
- V_{od} : Tensión de salida de eje directo del inversor

Finalmente, ΔV se añade al bucle de control Q-V, teniéndose las siguientes expresiones:

$$V = V_n - K_Q Q - \Delta V \quad (3-8)$$

$$\Delta Q = \frac{V_{min} - V_{ol} - \Delta V}{K_Q} \quad (3-9)$$

Donde:

- V_{min} : Umbral de tensión
- V_{ol} : Tensión durante la condición de sobrecarga

De esta manera se aplica la técnica de CVR mediante controladores droop, teniéndose finalmente una reducción en la demanda de energía pico debido a la reducción de tensión. Además, se puede emplear el deslastre de cargas durante situaciones de sobrecarga crítica como mecanismo de apoyo a la técnica de CVR y de esta manera mantener la estabilidad en la MG. En este sentido, los resultados del estudio demuestran que la técnica de CVR es efectiva para obtener una síntesis de inercia y mejoras en cuanto a la respuesta de frecuencia. Sin embargo, en MG aisladas se requieren estudios conjuntos de dinámica y transitorios de los controladores droop con CVR [7].

3.2.2.2 Implementación de la técnica de CVR a través de controladores droop V-I

Cuando se emplea el controlador droop V-I (tensión-corriente), el reparto de potencia entre los diversos IIDG se reduce a un reparto de corriente entre los mismos. Además, la impedancia total de la línea es de gran importancia, ya que, junto con las mediciones de corriente a la salida de los IIDG, determinan el desempeño de esta técnica. De acuerdo con resultados obtenidos mediante simulaciones, esta técnica es capaz de reducir los tiempos de resolución de fallas con respecto a otras técnicas droop. No obstante, el empleo de controladores droop V-I para la implementación de la técnica de CVR tiene una serie de inconvenientes en cuanto a su uso. Así, mediante la utilización de esta técnica resulta difícil un reparto preciso de potencia entre los IIDG debido a la falta de un control preciso destinado a esta acción. Otro inconveniente se presenta en una MG mallada, debido a que las impedancias a lo largo de los alimentadores no se calculan de manera precisa, lo que ocasiona que los controladores droop V-I no sean una alternativa adecuada para la implementación de la técnica de CVR [7].

3.2.2.3 Implementación de la técnica de CVR a través de controladores droop de corriente

Los controladores droop de corriente utilizados en MG aisladas para la implementación en la técnica de CVR son controladores droop modificados, los cuales se emplean para enfrentar los problemas y limitaciones de los controladores droop convencionales. Por medio de esta técnica se consigue una mayor velocidad de respuesta de los IIDG ante las variaciones en la demanda de los clientes, siendo este su meta principal. El reparto de potencia entre los inversores y la implementación conjunta de la técnica de CVR es posible gracias a múltiples controladores droop basados en corriente. La síntesis de inercia y el soporte de frecuencia son posibles de igual manera con la utilización de estos controladores. Además, existe una mejora de la confiabilidad y estabilidad de la MG con respecto a los controladores convencionales, puesto que, análisis de estabilidad de pequeña señal realizados en simulaciones muestran un incremento en la amortiguación del sistema [7].

3.3 Evaluación de los efectos de la técnica de CVR en sistemas eléctricos modernos

Cuantificar los efectos que tiene la implementación de la técnica CVR en la tensión, frecuencia y en la potencia activa y reactiva demandada por la carga es fundamental en las redes eléctricas modernas basadas en PE. Los métodos de evaluación tradicionales no permiten analizar todos los efectos de la técnica de CVR, por lo que una solución es emplear estrategias de evaluación innovadoras, como por ejemplo métodos en línea o métodos basados en inteligencia artificial. Además, es de gran relevancia clasificar los métodos de evaluación de la técnica de CVR de acuerdo a su aplicación, y de esta manera conseguir una valoración completa de los mismos y la elección adecuada de los equipos y herramientas necesarias [7]. En la Figura 3-9 se presenta una clasificación de los métodos para cuantificar los efectos de la implementación de la técnica de CVR. Se

observa una división en dos grupos. El primero corresponde a los métodos que se utilizan para evaluar los efectos cuando la aplicación de la técnica de CVR es conseguir el ahorro energético y una reducción de la demanda pico (aplicaciones a largo plazo). El segundo grupo corresponde con los métodos destinados a evaluar los impactos de la técnica de CVR cuando se busca conseguir el soporte de frecuencia y la síntesis de inercia (aplicaciones a corto plazo).

Los métodos para la cuantificación de los efectos de la técnica de CVR en las aplicaciones a largo plazo se describieron en la sección 2.6., por lo que no se describirán nuevamente en esta sección.

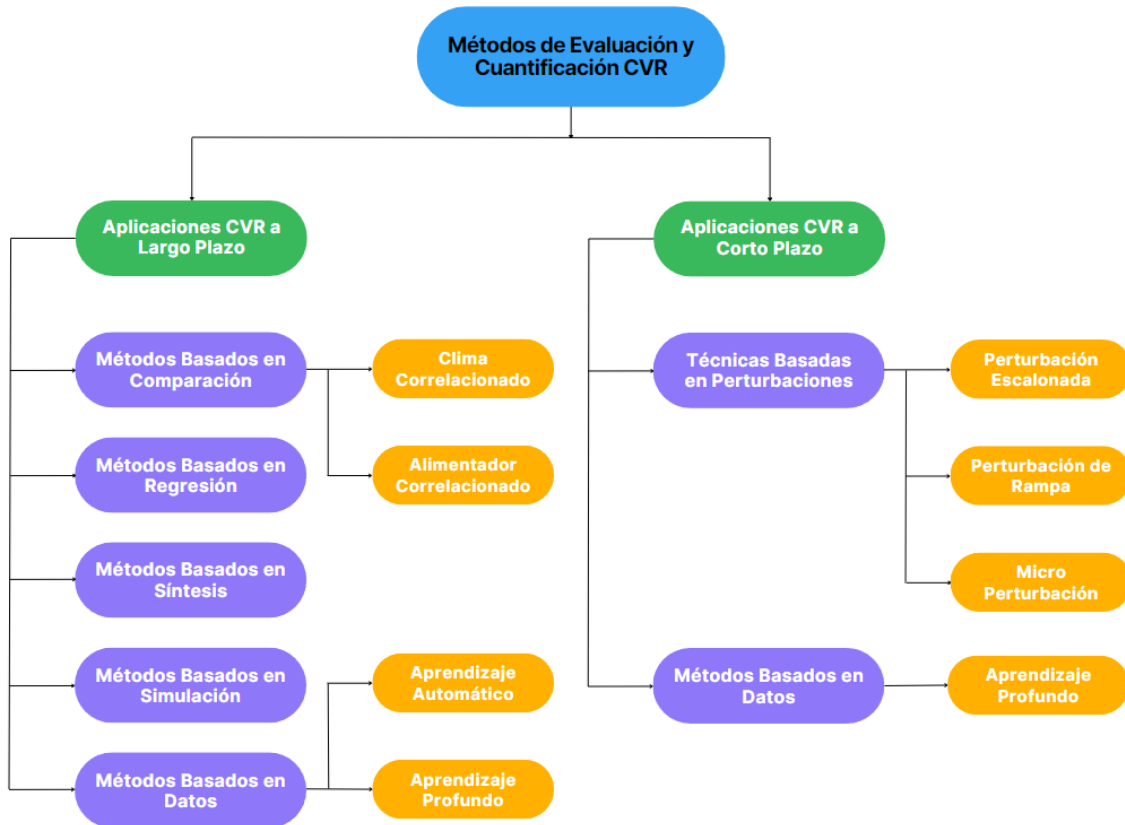


Figura 3-9. Clasificación de los métodos de cuantificación de la técnica de CVR.

3.3.1 Métodos de evaluación de los efectos CVR – Aplicaciones a corto plazo

Como se mencionó en la sección anterior, el soporte de frecuencia y la síntesis de inercia a través de la técnica de CVR son aplicaciones que ayudan a mejorar la estabilidad dinámica y transitoria de las redes modernas que incorporan una gran cantidad de IIDG. Estas son aplicaciones que funcionan en una escala de tiempo de corto plazo, por lo que los métodos convencionales de evaluación resultan ineficientes [7]. A continuación, se enumeran los problemas más importantes que enfrentan las técnicas clásicas de cuantificación de los efectos de la técnica de CVR cuando se emplean para aplicaciones a corto plazo:

- Las variaciones naturales que se producen en la tensión en las redes modernas debido a la presencia de inversores ocasionan distorsiones en los efectos de la técnica de CVR. Este es uno de los problemas más relevantes que enfrentan los métodos clásicos de evaluación. Además, debido a los cortos tiempos de respuesta tanto de los proveedores (IIDG) como de las cargas (SL), resulta necesario contar con métodos que sean capaces de cuantificar en tiempo real y de manera continua los efectos de la técnica de CVR; acciones que los métodos convencionales no pueden realizar.
- Las técnicas de evaluación convencionales están destinadas a funcionar en estados estacionarios, no siendo estos aptos para evaluar los efectos de la técnica de CVR en un régimen transitorio y dinámico. Por esta razón, se necesita técnicas que sean capaces de evaluar los efectos de la técnica de CVR en cualquier escala de tiempo.

- La reducción del ruido de los datos durante el régimen dinámico y transitorio resulta esencial para evaluar los efectos de la técnica de CVR durante estos periodos de tiempo. De esta manera, es necesario contar con un método de evaluación que incluya dentro de sus funciones la reducción del ruido.

A continuación, se describe los métodos de evaluación de los efectos de la técnica de CVR para aplicaciones a corto plazo.

3.3.1.1 Técnicas basadas en perturbaciones

Las técnicas basadas en perturbaciones permiten la evaluación de los efectos de la implementación de la técnica de CVR a través de estructuras de evaluación en línea, utilizando datos en tiempo real de tensión y carga. De esta manera, se emplea estrategias planificadas y anticipadas de perturbaciones de tensión para obtener de manera constante los datos necesarios para cuantificar los efectos de la técnica de CVR. El efecto de la técnica de CVR es producido por la perturbación, y sus efectos son cuantificados con los datos obtenidos durante el experimento, obteniéndose de esta manera el factor $CVR_{f(kW)}$. Existen diversas señales de perturbación empleadas en estos métodos, teniendo cada una un método de reducción de ruido y un método de cuantificación del efecto CVR asociados [7]. De acuerdo a la señal de perturbación empleada, se tienen los siguientes métodos de evaluación:

- Método de perturbación escalonada
- Método de perturbación de rampa
- Método de micro perturbación



Figura 3-10. Señales de perturbación empleadas en las técnicas basadas en perturbaciones [7].

En la Figura 3-10 se observa las señales asociadas a los tres métodos antes mencionados. Estos métodos cuantifican los efectos de la técnica CVR por medio del $CVR_{f(kW)}$. Además, el método de micro perturbación también permite obtener la sensibilidad carga-tensión LTV. En cuanto a las técnicas de reducción del ruido, cada método tiene una técnica diferente [7].

Método de Perturbación Escalonada

- En [38] se utiliza el método de perturbación escalonada para cuantificar los efectos de la técnica de CVR en un ambiente industrial. La perturbación escalonada es generada por un dispositivo de inyección de tensión con abrazadera. En el experimento una pequeña señal de tensión (0.5%-1%) se inyecta en serie con la tensión de alimentación. Los cambios en la potencia generados son medidos para calcular el factor CVR.
- El método de perturbación escalonada reduce el ruido local empleando para ello un método de regresión robusto [7].

Método de Perturbación de Rampa

- El método de perturbación de rampa también reduce el ruido local, aunque esta vez esto se realiza mediante técnicas de reducción de ruido personalizadas [7].
- Tanto el método de perturbación escalonada como el método de perturbación de rampa presentan ciertas barreras técnicas en cuanto a su utilización para cuantificar los efectos de la técnica de CVR a corto plazo. Entre dichas barreras se encuentran que los métodos mencionados presentan cierta inestabilidad, lo que genera errores en el cálculo del factor CVR cuando existe mucho ruido. Además, estos métodos únicamente calculan el factor CVR, lo que puede generar problemas de precisión, puesto que el factor CVR es utilizado principalmente para evaluar los efectos en aplicaciones de

estado estacionario [7].

Método de micro perturbación

- En cuanto al método de micro perturbación, como se mencionó previamente, permite obtener el factor CVR y la función de transferencia de la sensibilidad LTV, lo que posibilita la evaluación de los efectos de la técnica de CVR en todas las escalas de tiempo, incluidos el régimen dinámico y transitorio [7].
- Este método es el más preciso de los antes mencionados, así como también presenta la mejor capacidad de reducción del ruido [7].
- La desventaja de este método radica en su elevado costo y en su estructura complicada, puesto que necesita equipos de última generación [7].

3.3.1.2 Métodos basados en datos – Aplicaciones a corto plazo

Los métodos basados en datos permiten evaluar los efectos de la técnica de CVR en aplicaciones a corto plazo. Estos métodos son de alta precisión y emplean algoritmos basados en redes neuronales profundas. A manera de ejemplo, la precisión de estos métodos ha sido comprobada en dos investigaciones mencionadas en [7]. En la primera investigación, los resultados muestran como la técnica empleada es capaz de predecir los ahorros de carga y rastrear su comportamiento dinámico, lo que la convierte en una técnica eficaz para su utilización en la cuantificación a corto plazo de los efectos de la técnica de CVR. Esta técnica se ha aplicado en una empresa distribuidora y ha arrojado resultados con una precisión notable, con errores mínimos del 0.22%. De igual manera en la segunda investigación, los resultados obtenidos muestran una alta exactitud para evaluar el impacto de la técnica de CVR.

3.4 Tendencias Futuras de la técnica de CVR

La técnica de CVR es una manera eficiente y económica de conservar energía; sin embargo, a pesar de que es una práctica establecida, aún hay un extenso trabajo por delante para examinarla y perfeccionar su eficacia [4]. A continuación, se describe las tendencias futuras de la técnica de CVR en cuanto a sus aplicaciones, técnicas de implementación y métodos de evaluación [7].

3.4.1 Tendencias futuras de las aplicaciones de la técnica de CVR

La técnica de CVR posee muchas aplicaciones en las redes eléctricas modernas basadas en PE. En el futuro, esta técnica puede emplearse para mejorar tanto los aspectos económicos como mejoras en la estabilidad de los sistemas. Así, se pueden clasificar los desarrollos futuros de la técnica de CVR en dos categorías: aplicaciones CVR relacionadas al aspecto económico y aplicaciones CVR destinadas a la síntesis de inercia y soporte de frecuencia.

3.4.1.1 Aspecto económico

En los sistemas de energía eléctrica, especialmente en las redes modernas que incorporan RES, el tema económico juega un papel fundamental, por lo cual abordar los problemas asociados a este aspecto resulta algo trascendental. Si bien no se ha analizado en gran medida el uso de la técnica de CVR como respuesta a los desafíos económicos, esta técnica puede representar una solución eficiente a estas problemáticas, por lo que un campo de estudio surge de la necesidad de realizar investigaciones adicionales en esta temática.

3.4.1.2 Síntesis de Inercia y Soporte de Frecuencia

Tanto la síntesis de inercia como el soporte de frecuencia son aplicaciones a considerar de la técnica de CVR en las redes eléctricas modernas basadas en PE. Esto resulta especialmente importante cuando existe una alta presencia de IIDG en el sistema. Si bien se ha obtenido avances en esta temática, por ejemplo, con el uso de cargas inteligentes, es necesario realizar más investigaciones y de esta manera estudiar la contribución de la técnica de CVR en lo que respecta a la inercia del sistema y las mejoras asociadas al tema de estabilidad y soporte de frecuencia.

3.4.2 Tendencias futuras de las técnicas de implementación de la técnica de CVR

En las redes eléctricas modernas, para la implementación de la técnica de CVR, ya se emplean equipos avanzados. Sin embargo, existen desafíos técnicos que deben ser analizados en el futuro para mejorar la operatividad de la técnica de CVR.

3.4.2.1 Reparto de potencia

Se requiere más investigaciones en lo que respecta al reparto de potencia entre los inversores de una MG, ya que este tema resulta ser una barrera para la implementación adecuada de la técnica de CVR, especialmente en las redes eléctricas que emplean controladores droop. Así, tanto los controladores de corriente y tensión de los IIDG, como el desempeño de la técnica de CVR se ven afectados por la falta de una adecuada estrategia de asignación de potencia. Por lo tanto, representa un reto para las MG lograr un control preciso entre las fuentes de energía y el intercambio de energía reactiva cuando la los perfiles de tensión son modificados por la técnica de CVR.

3.4.2.2 Topología de la red

La topología de la red en los sistemas eléctricos modernos juega un papel significativo a la hora de implementar la técnica de CVR. En una topología mallada, el uso de la técnica de CVR genera una complicación importante en lo que respecta a la distribución de potencia, haciendo que este proceso sea más difícil y sensible a la impedancia de la red. Esto resulta sobre todo importante cuando se implementa la técnica de CVR en redes aisladas. De esta manera, una línea de investigación relevante está relacionada con el estudio de la implementación de la técnica de CVR en microrredes que presenten una topología mallada.

3.4.2.3 Modo de operación de las microrredes

Las MG tienen la capacidad de funcionar tanto de manera aislada como conectadas a la red principal. En este sentido, resulta relevante analizar el efecto de la técnica de CVR durante los periodos de transición de las MG de operar de manera aislada a operar conectada a la red principal y viceversa; esto con el objetivo de evitar problemas técnicos que puedan presentarse durante dichas transiciones. Por consiguiente, se plantea perspectivas para investigaciones futuras en este ámbito.

3.4.2.4 CVR y la Inteligencia Artificial

Un campo de estudio innovador está relacionado a los métodos de implementación de la técnica de CVR en redes modernas empleando metodologías basadas en inteligencia artificial. Los estudios que se hagan sobre esta temática pueden generar grandes avances que permitan superar las limitaciones y problemas que presentan las técnicas actuales de implementación.

3.4.3 Tendencias futuras de los métodos de evaluación de la técnica de CVR

Evaluar los efectos de la técnica de CVR es de suma importancia en las redes eléctricas modernas. Si bien existen varios métodos que permiten evaluar de manera efectiva los efectos de la técnica de CVR, todavía existen ciertos vacíos en algunas áreas de investigación, mismas que deben ser estudiadas y analizadas.

3.4.3.1 Aplicaciones de la técnica de CVR a corto plazo e Inteligencia Artificial

La evaluación de los efectos de la técnica de CVR empleando métodos basados en datos muestran una exactitud y precisión de acuerdo con resultados experimentales y de simulación. Por otra parte, existe un gran crecimiento de las aplicaciones a corto plazo de la técnica de CVR, por lo que resulta importante la cuantificación de sus efectos. De esta manera, surgen líneas de investigación para evaluar los efectos a corto plazo de la técnica de CVR empleando metodologías basadas en inteligencia artificial. Si bien existen algunas investigaciones que se han realizado sobre esta materia, aún falta un gran camino por recorrer.

4 CASOS DE ESTUDIO CVR

En este capítulo se presenta un resumen de los resultados de proyectos que se han implementado en Estados Unidos y Canadá en lo referente a la técnica de CVR para ahorrar energía. Esto permite apreciar los resultados obtenidos en la práctica de la tecnología CVR. En algunos casos, se describe la metodología empleada por las empresas de servicios eléctricos, mientras que en otros se presentan únicamente los resultados obtenidos de la implementación de la técnica de CVR.

En Europa, las empresas de servicios eléctricos de la mayoría de países operan en el rango de tensión superior. A pesar del gran potencial que la técnica de CVR presenta en estos países, su implementación se ha visto limitada debido a la falta de estudios sobre este tema [20]. No obstante, en [4] se menciona que en Irlanda se logró una reducción del consumo de energía del 1.7% gracias a la implementación de la técnica de CVR.

4.1 Casos de Estudio – Estados Unidos

En [9] se presenta un resumen de ocho casos de estudio asociados a la implementación práctica de la técnica de CVR/VVO. Estos casos de estudio pertenecen a empresas de servicios eléctricos dentro de los Estados Unidos.

4.1.1 Caso de Estudio 1 – ENERGÍA ELÉCTRICA AMERICANA (AEP)

La compañía AEP tiene una gran cantidad de compañías afiliadas y los resultados de la implementación de la técnica de CVR en las mismas muestran una reducción de la energía demandada dentro del 0.7% – 1.2% por cada 1% de reducción en la tensión. Además, el programa de CVR implementado por la compañía AEP Ohio muestra que se consigue una reducción del 2.9% en la energía reduciendo del 3% – 5% la tensión. De igual forma, la compañía anterior muestra resultados en cuanto a la aplicación de la técnica de CVR para reducir la demanda pico del sistema, ya que una reducción del 3% – 4% de la tensión ocasiona una disminución entre el 2% y el 3% de la demanda pico del sistema.

4.1.2 Caso de Estudio 2 - DISTRITO DE SERVICIOS PÚBLICOS DEL PUEBLO DE CENTRAL LINCOLN (EMPRESA DE SERVICIOS ELÉCTRICOS DE OREGÓN)

En 2014 el distrito de servicios públicos del pueblo de Central Lincoln puso en marcha un programa piloto de implementación de la técnica de CVR que operó por seis meses durante el verano y el invierno. Se empleó métodos basados en comparación para la estimación de los factores CVR horarios y luego mediante un análisis estadístico se determinó el factor CVR global del sistema. La tensión de consigna del OLTC en la subestación Lincoln Beach durante toda la duración del programa se redujo de 123.5 V a 119.5 V, garantizando siempre que todos los usuarios reciban un suministro de tensión dentro del rango permitido. Con los resultados obtenidos se estimó el ahorro de energía producido con la implementación de la técnica de CVR [9] [39]. Los resultados se muestran en la Tabla 4-1.

Tabla 4–1. Factor CVR y Ahorro Energético del Distrito de servicios públicos del pueblo de Central Lincoln [39].

Lincoln Beach	Reducción de Tensión	Factor CVR	Ahorro de Energía
Verano	3.09%	0.43	1.49%
Invierno	2.35%	1.05	2.49%

4.1.3 Caso de Estudio 3 – COMPAÑÍA DE ENERGÍA DE IDAHO (IPC)

IPC puso en marcha un programa en el cual 30 alimentadores se escogieron para la implementación de la técnica de CVR. Para evaluar los efectos de la técnica de CVR se empleó el método de comparación, específicamente el método de alimentador correlacionado, en donde se buscó que el alimentador de control presente las mismas condiciones climáticas que el alimentador de tratamiento. Así, se eligió alimentadores que estén lo más cercanos geográficamente. Además, los alimentadores se escogieron de tal manera que tengan una distribución similar de clientes. Para cuantificar los efectos de la técnica de CVR, se eligió una metodología de dos días con CVR activada seguido de dos días con CVR desactivada durante un año; esto con el objetivo de que la carga se recupere de los cambios en la tensión de alimentación. De esta manera, el factor CVR se calculó para seis zonas geográficas distintas y para dos diferentes tipos de clientes (residencial y comercial). Los factores CVR calculados se presentan en la Tabla 4-2.

Tabla 4–2. Factores CVR – IPC

Alimentador	Factor CVR Residencial	Factor CVR Comercial
Boise	0.86	0.78
Pocatello	0.63	0.87
Twin Falls	0.41	0.65
Ketchum	1.16	1.11
McCall	5.75	2.89
Ontario	0.91	0.19

4.1.4 Caso de Estudio 4 – COMPAÑÍA DE ENERGÍA WEST PENN

La compañía de energía West Penn realizó estudios en su sistema durante los años 2012 – 2014 para analizar los efectos de la implementación de la técnica de CVR. Los estudios se realizaron durante primavera, verano e invierno. Para cuantificar los efectos de la técnica de CVR se empleó subestaciones de tratamiento y control, y un método basado en regresión. La metodología empleada consistió en reducir la tensión un 1.5%. En verano y primavera, los estudios se realizaron durante una semana utilizando un enfoque de un día con CVR activada seguido de un día con CVR desactivada. En el caso del invierno, los estudios se realizaron durante dos semanas, empleando un enfoque de CVR activada durante una semana seguido de CVR desactivada durante otra semana. De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que existe una gran variabilidad en cuanto al factor CVR obtenido. Los resultados se muestran en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3. Factores CVR – Compañía de energía West Penn

Estación	Factor CVR Residencial
Verano	0.85
Primavera	1.11
Invierno	0.64
–	Promedio: 0.86

4.1.5 Caso de Estudio 5 – COMPAÑÍA ELÉCTRICA DE FILADELFIA (PECO)

La compañía eléctrica de Filadelfia desarrolló un programa para evaluar los efectos de la implementación de la técnica de CVR cuyo objetivo es conseguir un ahorro en cuanto a la energía y a la demanda. Esta evaluación se realizó mediante un modelo basado en regresión, en donde se tuvo en cuenta variables independientes como la temperatura para analizar la influencia del clima en el consumo de energía, en los cambios de la tensión y en el factor CVR. Para el análisis se emplearon datos horarios de las cargas y datos de tensión obtenidos de transformadores y alimentadores. Además, para el análisis, se incluyeron datos tanto de las semanas inmediatamente anteriores y posteriores a la implementación de la técnica de CVR. Finalmente, el factor CVR promedio de todo el sistema se obtuvo empleando métodos estadísticos. Los resultados obtenidos presentaron un factor CVR promedio del sistema de 1.08. De igual forma, se estimó un ahorro de aproximadamente 320 GWh/año con la implementación del programa por parte de PECO.

4.1.6 Caso de Estudio 6 – DUKE ENERGY OHIO

La compañía Duke Energy Ohio ha implementado programas piloto relacionadas a CVR entre 2008 y 2016 en algunas ubicaciones de su área de servicio. Estudios realizados anteriormente demostraron que con la reducción de 1% de la tensión se conseguían ahorros del 0.50% – 0.79%, siendo el valor típico de 0.65%. Estos valores constantes del factor CVR (0.50, 0.65 y 0.79) se emplearon para realizar distintas estimaciones. De acuerdo con los resultados de las estimaciones, si el programa se implementa durante todo el año (8760 horas), se conseguiría un ahorro de energía del sistema entre el 1.00% y el 1.58%.

4.1.7 Caso de Estudio 7 – SOUTHERN CALIFORNIA EDISON

La empresa Southern California Edison implementó un VVC de distribución (DVVC) como parte de un proyecto de demostración de red inteligente. La metodología con la que se puso en marcha el DVVC fue una semana activado seguido de una semana desactivado, esto durante 32 semanas de prueba. Además, durante cada semana se registró el consumo de energía y se ajustó la temperatura. Los resultados obtenidos fueron una reducción de 2 V sobre una base de 120 V y una reducción de las fluctuaciones de tensión. El factor CVR promedio obtenido fue de 1.56. Comparando los resultados obtenidos con la información de un año base, se logró una disminución del 1.58% en la tensión promedio y un ahorro energético promedio del 2.53%.

4.1.8 Caso de Estudio 8 – ALIANZA PARA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL NOROESTE (NEEA)

Durante los años 2007 – 2008 se realizó un estudio piloto en 14 empresas de servicios públicos del Pacífico Noroeste. El estudio quería cuantificar los efectos de la técnica de CVR en el consumo de energía. La metodología de implementación fue un día activada la técnica de CVR y el siguiente día desactivada. Los resultados en cuanto al ahorro energético cumplieron con las expectativas, ya que se consiguieron reducciones del 1% –3%, del 2% –4% y del 4% –10% en la energía total, la demanda de energía activa y la demanda de energía reactiva respectivamente. Además, de acuerdo con resultados obtenidos en simulaciones, se demostró que entre el 10% y el 40% de los ahorros de energía se producen en el lado de la empresa de servicios públicos al realizar ciertas mejoras en el sistema. Los factores CVR se calcularon para 6 empresas (en algunas se calcularon los factores CVR para más de una subestación) y los resultados se presentan en la Tabla 4-4.

Tabla 4–4. Factores CVR – NEEA

Compañía	Subestación	Factor CVR
Avista	1	0.93
Clark	1	0.88
Douglas	1	0.17
	2	1.12
Idaho Power	1	0.55
	2	0.61
	3	0.74
Puget Sound Energy	1	0.80
	2	0.85
Distrito de Servicios Públicos del Condado de Snohomish	1	0.74

4.2 Caso de Estudio – Canadá

En [40] se presenta los resultados de un proyecto piloto de CVR realizado en Canadá por parte de la empresa NB Power. El proyecto se realizó entre los años 2018 y 2020, obteniéndose los resultados experimentales entre noviembre del 2019 y noviembre del 2020. Cuatro subestaciones formaron parte del estudio, las cuales fueron equipadas con controladores OLTC. En total se tuvieron 10 alimentadores de las cuatro subestaciones antes mencionadas. Un total de 5506 edificios residenciales y 527 edificios comerciales participaron en el proyecto. Adecuaciones hechas en los sistemas de medición de los clientes y con el uso del sistema SCADA permitieron mantener los perfiles de tensión dentro de los rangos adecuados, con lo que se consiguió tener una mayor reducción de la tensión.

La metodología empleada en este proyecto fue la trabajar con las subestaciones/alimentadores con la técnica de CVR activada y al día siguiente trabajar a tensión normal, es decir con la técnica de CVR desactivada. De esta manera, las mismas subestaciones/alimentadores funcionan como tratamiento y control. Para cuantificar los ahorros de energía se emplearon técnicas estadísticas. Además, debido a la influencia de las estaciones del año en la funcionalidad de la técnica de CVR, las estimaciones de energía se obtuvieron para cada una de las estaciones por separado. En los días con CVR desactivada, los OLTC regularon la tensión a 125 V en tanto que los días que la técnica de CVR se encontraba activada, los OLTC regularon la tensión dentro del rango de 118 V – 120 V. La regulación de tensión realizada cumple con el estándar establecido en Canadá, el cual establece el rango normal de la tensión entre 110 V y 125 V.

Una vez realizados los experimentos, se comprobó que la reducción de tensión promedio en todas las subestaciones era alrededor del 5%, siendo la máxima reducción obtenida del 5.6% y la mínima de 3.4%. En cuanto al consumo anual de energía activa, los resultados mostraron una reducción del 3.4%. En la Tabla 4-5 se presenta la reducción en la tensión correspondiente a cada una de las cuatro subestaciones y a cada estación del año.

Tabla 4–5. Valores promedios de reducción de tensión [40].

Subestación	Tensión	Invierno 2020	Primavera 2020	Verano 2020	Otoño 2020
Quispamsis	Tensión Promedio CVR: off	125.65	125.77	125.70	125.48
	Tensión Promedio CVR: on	121.39	119.77	118.63	119.01

	ΔV [V]	4.25	6.00	7.06	6.47
	ΔV [%]	3.4	4.8	5.6	5.15
Moncton	Tensión Promedio CVR: off	125.18	125.31	125.27	Mantenimiento
	Tensión Promedio CVR: on	118.76	118.63	118.47	Mantenimiento
	ΔV [V]	6.42	6.68	6.80	Mantenimiento
	ΔV [%]	5.1	5.3	5.4	Mantenimiento
Bathurst	Tensión Promedio CVR: off	125.35	125.53	125.48	125.36
	Tensión Promedio CVR: on	119.23	118.97	118.94	118.45
	ΔV [V]	6.12	6.56	6.54	6.91
	ΔV [%]	4.88	5.22	5.21	5.52
Fredericton	Tensión Promedio CVR: off	124.58	124.47	124.57	124.60
	Tensión Promedio CVR: on	119.16	118.66	118.99	118.75
	ΔV [V]	5.42	5.81	5.58	5.85
	ΔV [%]	4.4	4.7	4.48	4.70

Existe dificultad para obtener los ahorros de energía gracias a la implementación de la técnica de CVR, ya que, por lo general, esta reducción está dentro del rango del 1% – 3% en la mayoría de los circuitos. Debido a lo anterior, se requiere emplear métodos estadísticos rigurosos. En este proyecto se utilizó un método de regresión lineal media y multivariada con tres variaciones para la estimación de los ahorros de energía; es decir, se utilizaron tres modelos estadísticos. En base a esto, se pudo calcular los factores CVR para cada una de las subestaciones para cada estación del año. Los resultados obtenidos se aprecian en la Figura 4-1. Además, se obtuvo factores promedio CVR anuales para cada una de las subestaciones (Figura 4-2). De acuerdo con los resultados obtenidos, se estima que el factor CVR en este estudio está dentro del rango de 0.6 – 0.7. En cuanto al ahorro de energía, basados en las estimaciones del modelo 1, se produjo un ahorro de 1.67 GWh (3.4%) en las cuatro subestaciones a lo largo de 1 año y con una reducción promedio de la tensión del 5%. Esta reducción de energía lleva asociada la correspondiente reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, que en este caso fue de 459 toneladas. Empleando el modelo 2, el ahorro de energía fue de 1.4 GWh y la reducción asociada de 386 toneladas de gases de efecto invernadero.

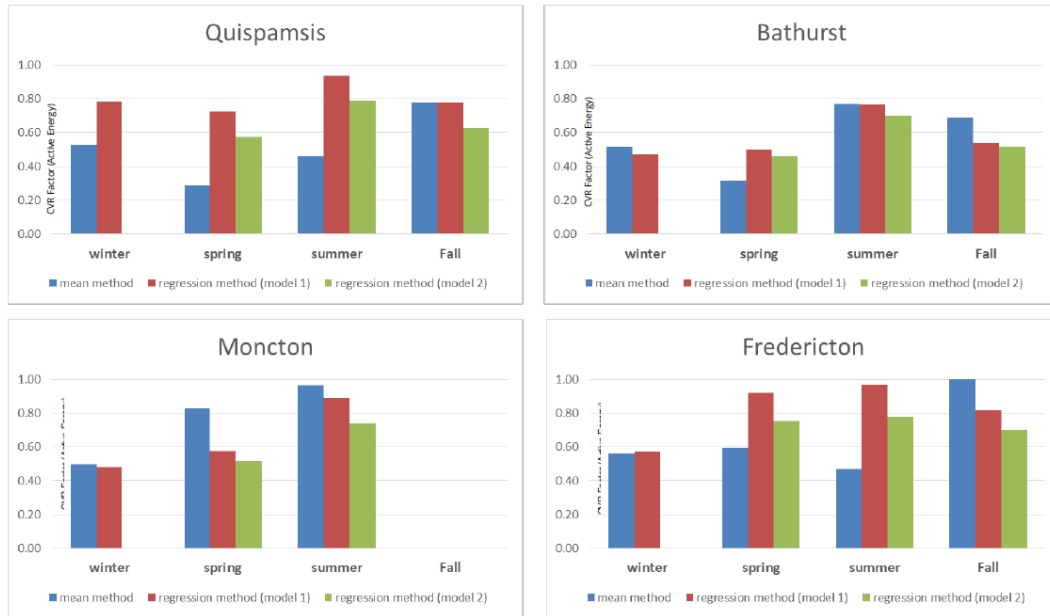


Figura 4-1. Factor CVR obtenidos para cada estación del año [40].

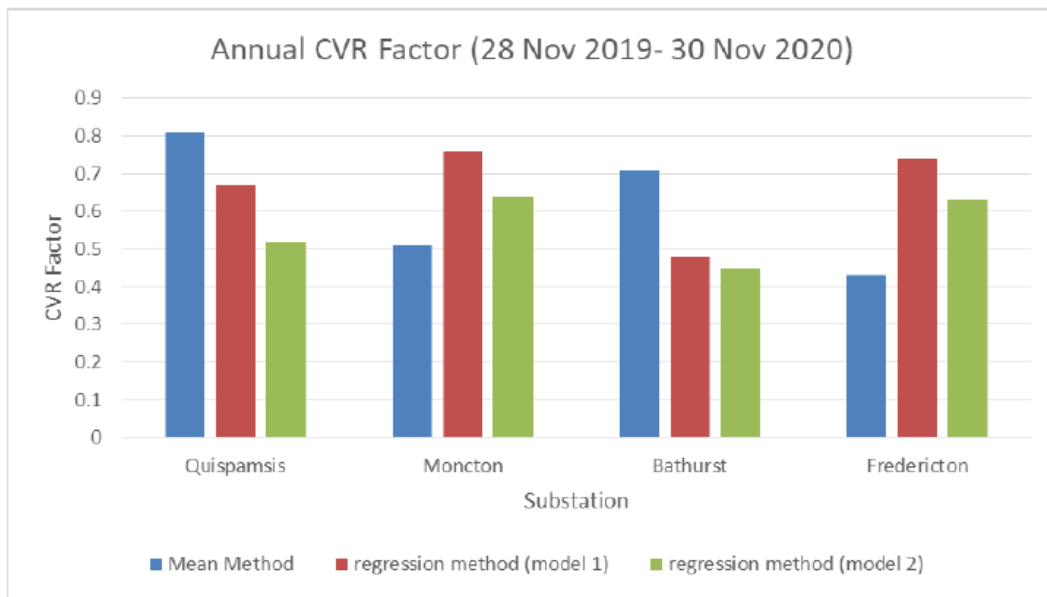


Figura 4-2. Factor CVR promedio anual de cada subestación [40].

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones y recomendaciones obtenidas con el desarrollo de este trabajo se presentan a continuación.

5.1 Conclusiones

Una vez finalizado el desarrollo de este trabajo, se llegó a las siguientes conclusiones:

- La revisión exhaustiva del estado del arte acerca de la Conservation Voltage Reduction (CVR) ha logrado proporcionar una visión integral y actualizada de los aspectos teóricos, técnicos y prácticos de esta estrategia de gestión de energía eléctrica.
- Se ha destacado los fundamentos teóricos de la técnica de CVR, en donde se describe la definición, su evolución histórica y estado actual, sus aplicaciones en los sistemas eléctricos y las distintas técnicas de implementación y cuantificación de sus efectos.
- Al analizar la literatura, se determinó como la técnica de CVR constituye una gran técnica para las empresas distribuidoras para lograr ahorros de energía y disminuir la demanda en las horas picos. Además, sumado a que los costes de implementación no representan un mayor gasto para las empresas, convierten a la técnica de CVR en una opción viable para mejorar la eficiencia energética en el sector eléctrico. Sin embargo, hay que tener en cuenta que los resultados que se obtienen con la implementación de la técnica de CVR varían significativamente en función de una multitud de factores, tales como la naturaleza y el comportamiento de la carga, la configuración del sistema, la estación del año, las condiciones climáticas, entre otros. En consecuencia, los beneficios específicos y los resultados obtenidos son inherentemente particulares a cada caso práctico. Por lo tanto, la aplicación exitosa de la técnica de CVR requiere una evaluación cuidadosa y la consideración de las condiciones particulares de cada entorno operativo.
- El factor CVR permite evaluar de manera efectiva los efectos de la implementación de la técnica de CVR en los sistemas eléctricos. De esta manera, este factor es una medida de que tan eficiente resulta la reducción de la tensión para lograr ahorros en cuanto a la energía y/o potencia de los sistemas eléctricos.
- Contar con modelos de carga precisos que permitan evaluar los efectos de la implementación de la

técnica de CVR es algo fundamental. En este trabajo se presenta una descripción detallada de los dos grupos principales de modelos de carga que se emplean a nivel mundial. Esta exposición permite tener una comprensión más completa acerca de las herramientas de modelado que se utilizan en contextos relacionados a la técnica de CVR.

- En los sistemas eléctricos modernos basados en PE que incorporan generación distribuida, la técnica de CVR surge como una herramienta que presenta múltiples beneficios y aplicaciones. La técnica de CVR puede emplearse en este campo tanto para las aplicaciones tradicionales de ahorro energético y reducción de la demanda pico del sistema, como para aplicaciones en escalas de tiempo mucho más cortas. Justamente dentro de este último grupo se encuentran la síntesis de inercia y el soporte de frecuencia, que son aplicaciones de la técnica de CVR destinadas a mejorar la estabilidad dinámica y transitoria de los sistemas eléctricos modernos. Además, las técnicas de implementación de la técnica de CVR y los métodos de evaluación de sus efectos deben seleccionarse cuidadosamente en función de la aplicación final a la que este destinada.
- El empleo de técnicas basadas en inteligencia artificial en contextos relacionados a la técnica de CVR es una realidad emergente. Estas técnicas tienen el potencial de brindar soluciones para mejorar la funcionalidad y la operatividad de la técnica de CVR en los años futuros.
- Se presentó los resultados de la implementación de la técnica de CVR en nueve casos prácticos en Estados Unidos y Canadá. Los resultados obtenidos muestran una implementación exitosa de la técnica de CVR. Además, en la mayoría de los casos se presenta los factores CVR obtenidos.

5.2 Recomendaciones

- Este trabajo puede servir como referencia valiosa para quienes deseen obtener una visión completa y actualizada sobre la temática de CVR. Los lectores, investigadores y profesionales del sector eléctrico pueden utilizar este trabajo como recurso para comprender los aspectos teóricos, técnicos y prácticos de la técnica de CVR.
- Para las empresas distribuidoras de electricidad, se sugiere considerar la técnica de CVR como una herramienta valiosa para mejorar la estabilidad y eficiencia de la red eléctrica, al tiempo que se contribuye a reducir las emisiones de carbono y se optimizan los recursos.
- Dado el continuo avance de la tecnología en el sector eléctrico, se recomienda a investigadores y profesionales a mantenerse al tanto de las últimas tendencias y desarrollos relacionados con la técnica de CVR, con el objetivo de aplicar las innovaciones más recientes en sus proyectos y estrategias.

REFERENCIAS

- [1] J. Zhao, Z. Wang, and J. Wang, “Robust Time-Varying Load Modeling for Conservation Voltage Reduction Assessment,” *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3304–3312, Jul. 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2630027.
- [2] H. Hussaini *et al.*, “EasyChair Preprint Conservation Voltage Reduction (CVR) Technique: A Review Conservation Voltage Reduction (CVR) Technique: A Review,” 2019.
- [3] P. K. Sen and K. H. Lee, “Conservation Voltage Reduction Technique: An Application Guideline for Smarter Grid,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 52, no. 3, pp. 2122–2128, May 2016, doi: 10.1109/TIA.2016.2525937.
- [4] Z. Wang and J. Wang, “Review on implementation and assessment of conservation voltage reduction,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 3, pp. 1306–1315, 2014, doi: 10.1109/TPWRS.2013.2288518.
- [5] A. Singaravelan and M. Kowsalya, “A Practical Investigation on Conservation Voltage Reduction for its Efficiency with Electric Home Appliances,” in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2017, pp. 724–730. doi: 10.1016/j.egypro.2017.05.187.
- [6] A. El-Shahat, R. J. Haddad, R. Alba-Flores, F. Rios, and Z. Helton, “Conservation voltage reduction case study,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 55383–55397, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2981694.
- [7] A. Gorjian, M. Eskandari, and M. H. Moradi, “Conservation Voltage Reduction in Modern Power Systems: Applications, Implementation, Quantification, and AI-Assisted Techniques,” *Energies*, vol. 16, no. 5. MDPI, Mar. 01, 2023. doi: 10.3390/en16052502.
- [8] T. S. Vitor, E. N. Asada, and J. C. de Melo Vieira, “Optimal Volt/Var Control Applied to Modern Distribution Systems,” pp. 1–56, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-36115-0_1.
- [9] Z. S. Hossein *et al.*, “Conservation voltage reduction and volt-VAR optimization: Measurement and verification benchmarking,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 50755–50770, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2979242.
- [10] “Voltage Tolerance Standard – ANSI C84.1 – Voltage Disturbance.” Accessed: Oct. 15, 2023. [Online]. Available: <https://voltage-disturbance.com/voltage-quality/voltage-tolerance-standard-ansi-c84-1/>
- [11] K. Zare and S. Nojavan, *Operation of Distributed Energy Resources in Smart Distribution Networks*. Elsevier, 2018. doi: 10.1016/B978-0-12-814891-4.00020-5.
- [12] K. P. Schneider, F. K. Tuffner, J. C. Fuller, and R. Singh, “Evaluation of Conservation Voltage Reduction (CVR) on a National Level,” 2010. Accessed: Nov. 07, 2023. [Online]. Available: https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-19596.pdf
- [13] M. L. Quezada Lucas, “Modelos de carga y sus efectos en estudios sistémicos: Aplicaciones Al Sing.,” 2013.
- [14] M. Diaz-Aguilo *et al.*, “Field-validated load model for the analysis of CVR in distribution secondary networks: Energy conservation,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 4, pp. 2428–2436, 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2271095.
- [15] K. McKenna and A. Keane, “Open and Closed-Loop Residential Load Models for Assessment of Conservation Voltage Reduction,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 4, pp. 2995–3005, Jul. 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2622978.
- [16] NRECA, “Costs and Benefits of Conservation Voltage Reduction CVR Warrants Careful Examination - FINAL REPORT,” 2014.

- [17] B. Hayes and K. Tomsovic, "Conservation Voltage Reduction in Secondary Distribution Networks with Distributed Generation and Electric Vehicle Charging Loads," *2018 5th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS)*, Kitakyushu, Japan, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/EPECS.2018.8443502.
- [18] Z. Wang and J. Wang, "Time-varying stochastic assessment of conservation voltage reduction based on load modeling," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 5, pp. 2321–2328, 2014, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2304641.
- [19] K. S. Shim *et al.*, "Estimation of conservation voltage reduction factors using measurement data of KEPCO system," *Energies (Basel)*, vol. 10, no. 12, Dec. 2017, doi: 10.3390/en10122148.
- [20] Abdelalim, M. M. A. (2022). Conservation voltage reduction in European grids: a case study over different voltage levels: Customer Plants, Low- and medium voltage [Diploma Thesis, Technische Universität Wien]. reposiTUm. <https://doi.org/10.34726/hss.2022.77584>
- [21] M. S. Hossan *et al.*, "Deployment of Conservation Voltage Reduction in Sample Feeders: A Systemwide Energy-Savings Analysis," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 27, no. 2, pp. 36–46, Mar. 2021, doi: 10.1109/MIAS.2020.3024487.
- [22] Dynamic Ratings, "On Load Tap Changer Monitoring (OLTC)." Accessed: Nov. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.dynamicratings.com/solutions/transformer-monitoring/oltc-monitoring/>
- [23] Grid Solutions, "Voltage Regulators." Accessed: Nov. 02, 2023. [Online]. Available: https://www.gegridsolutions.com/hvmv_equipment/catalog/voltage_regulators.htm
- [24] A. Dorrody, "Evaluation of Conservation Voltage Reduction as a tool for Evaluation of Conservation Voltage Reduction as a tool for demand side management demand side management Repository Citation Repository Citation 'Evaluation of Conservation Voltage Reduction as a tool for demand side management,'" pp. 5–6, doi: 10.34917/5836094.
- [25] EATON, "Bancos de condensadores de montaje en poste." Accessed: Nov. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.eaton.com/co/es-mx/catalog/medium-voltage-power-distribution-control-systems/pole-mounted-capacitor-banks.html>
- [26] C.-C. Liu, S.-J. Lee, and S. McArthur, Eds., *Smart Grid Handbook*, Wiley., vol. 3. Reino Unido: Wiley, 2016.
- [27] B. Li and Y. Ge, "Improving Power Quality by Smart Load," *Energy Procedia*, vol. 17, pp. 813–817, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2012.02.174.
- [28] R. Ardis and R. Uluski, "CVR Is Here to Stay." Accessed: Nov. 05, 2023. [Online]. Available: <https://www.tdworld.com/grid-innovations/smart-grid/article/20965787/cvr-is-here-to-stay>
- [29] Z. Wang, B. Chen, J. Wang, and M. M. Begovic, "Stochastic DG placement for conservation voltage reduction based on multiple replications procedure," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, pp. 1039–1047, Jun. 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2331275.
- [30] Z. Sun, M. Eskandari, C. Zheng, and M. Li, "Handling Computation Hardness and Time Complexity Issue of Battery Energy Storage Scheduling in Microgrids by Deep Reinforcement Learning," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16010090.
- [31] A. Hirsch, Y. Parag, and J. Guerrero, "Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90. Elsevier Ltd, pp. 402–411, Jul. 01, 2018. doi: 10.1016/j.rser.2018.03.040.
- [32] T. Chen, J. Guo, B. Chaudhuri, and S. Y. Hui, "Virtual Inertia from Smart Loads," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 11, no. 5, pp. 4311–4320, Sep. 2020, doi: 10.1109/TSG.2020.2988444.
- [33] K. P. Schneider *et al.*, "Improving Primary Frequency Response to Support Networked Microgrid Operations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 1, pp. 659–667, Jan. 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2859742.
- [34] H. V. Padullaparti, Q. Nguyen, and S. Santoso, "Advances in volt-var control approaches in utility

- distribution systems,”
- [35] Z. Akhtar, B. Chaudhuri, and S. Y. R. Hui, “Smart Loads for Voltage Control in Distribution Networks,” *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 8, no. 2, pp. 937–946, Mar. 2017, doi: 10.1109/TSG.2015.2486139.
 - [36] M. Eskandari, L. Li, M. H. Moradi, P. Siano, and F. Blaabjerg, “Active Power Sharing and Frequency Restoration in an Autonomous Networked Microgrid,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 6, pp. 4706–4717, Nov. 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2923797.
 - [37] A. Aderibole, H. H. Zeineldin, M. Al Hosani, and E. F. El-Saadany, “Demand Side Management Strategy for Droop-Based Autonomous Microgrids Through Voltage Reduction,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, no. 2, pp. 878–888, Jun. 2019, doi: 10.1109/TEC.2018.2877750.
 - [38] S. Jayaraman, M. Miranbeigi, P. Kandula, T. Grant and D. Divan, "Reducing Energy Consumption in Industrial Plants Using Behind the Meter Conservation Voltage Reduction," *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Portland, OR, USA, 2018, pp. 4791-4798, doi: 10.1109/ECCE.2018.8558461.
 - [39] New York State Public Service Commission, “Proceeding on Motion of the Commission in Regard to Reforming the Energy Vision (CASE 14-M-0101): Order Adopting a Ratemaking and Utility Revenue Model Framework,” 2015, Accessed: Oct. 15, 2023. [Online]. Available: <http://documents.dps.ny.gov/public/Common/ViewDoc.aspx?DocRefId=%7B3C9B9118-BBE7-4B3A-BF33-DDD2FA176D80%7D>
 - [40] NB Power, “Final Report - Conservation Voltage Reduction,” 2021.