



**UASLP**  
Universidad Autónoma  
de San Luis Potosí



FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
**UASLP**

# ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA CON BATERÍAS INTEGRADO A LA RED ELÉCTRICA



**DR. CIRO ALBERTO NÚÑEZ GUTIÉRREZ**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ**

**Facultad de Ingeniería**

**Centro de investigación y Estudios de Posgrado**

**San Luis Potosí S. L. P. , México**



**26 de febrero de 2021**

# ÍNDICE

- Almacenamiento de energía basado en baterías (BESS)
- Retos y oportunidades
- Interconectando energía de baterías a la red eléctrica
- Funciones de un BESS
- Retos de diseño y control
- Conclusiones

# Almacenamiento de energía basado en baterías (BESS)

Crecimiento en el tiempo del 2000 al 2018. Fuente: SANDIA

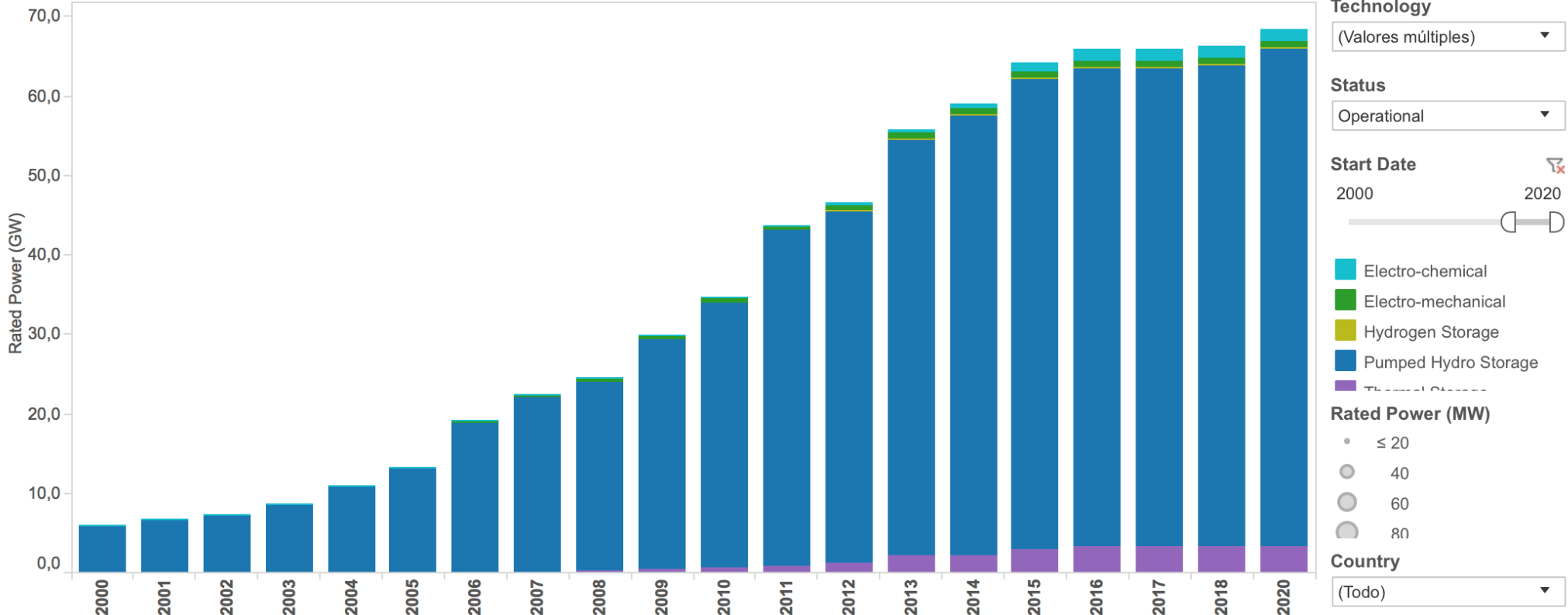
Data Visualization (Produced using Tableau Public)

Installations Over Time | ISO/RTO | Top 10 Countries | Use Cases

## DOE Global Energy Storage Database

Last Updated 16/8/2016 20:25:38 ()

### Global Project Installations Over Time

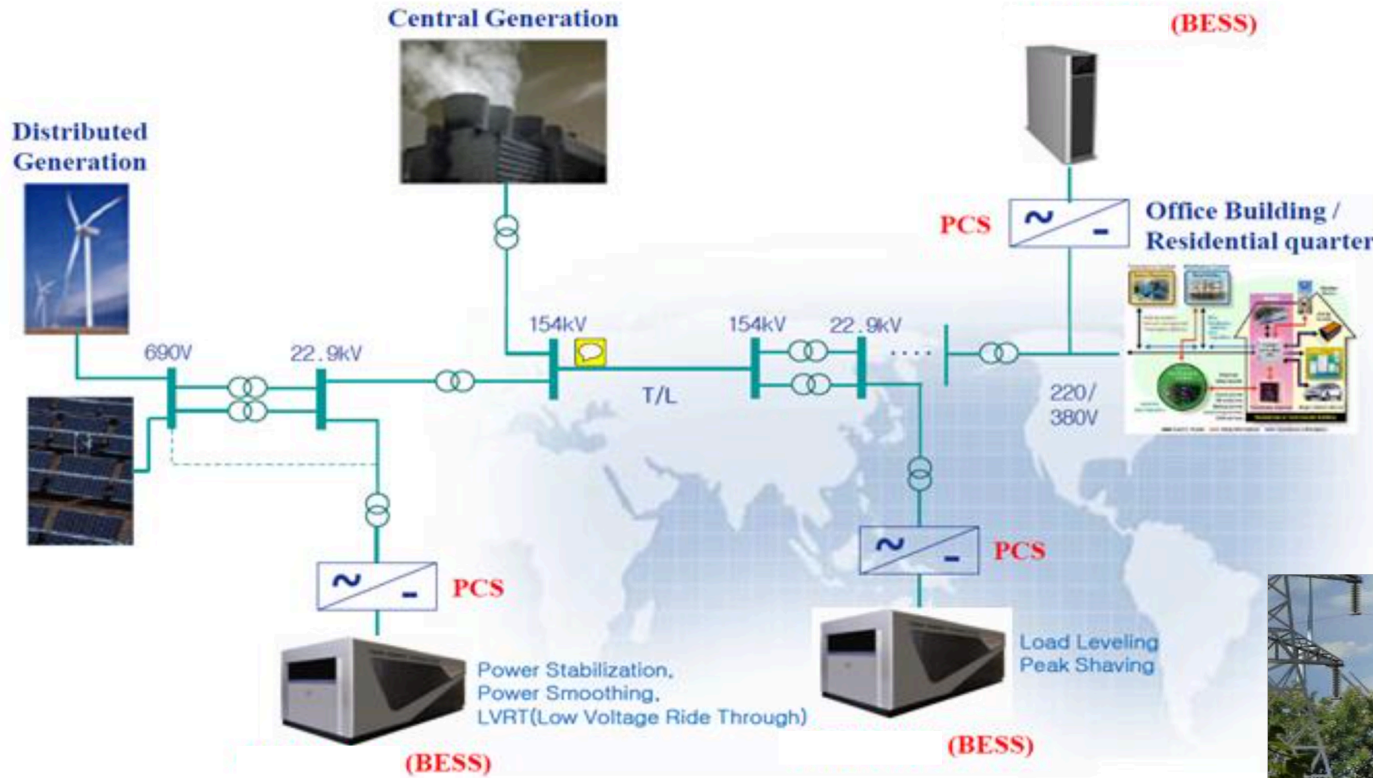


# Almacenamiento de energía basado en baterías (BESS)

Crecimiento por tipo de tecnología. Fuente: SANDIA

Technology Types		
Technology Type	Projects	Rated Power (MW)
Electro-chemical	1071	4673
Pumped Hydro Storage	352	185193
Thermal Storage	221	4031
Electro-mechanical	76	2649
Hydrogen Storage	14	22
Liquid Air Energy Storage	2	5
Lithium Ion Battery	1	24

# Almacenamiento de energía basado en baterías (BESS)



¿Dónde puede estar conectado un BESS?



# Retos y oportunidades

## Retos:

- Costos elevados de los sistemas de almacenamiento de energía basados en baterías
- No hay compensación del gobierno para almacenar energía en baterías
- Se requieren capacidades de almacenamiento muy grandes

## Oportunidades:

- El almacenamiento de energía es necesario para integración de energías renovables y para consumo
- Grandes cantidades de almacenamiento de energía provenientes de VE
- Los costos del almacenamiento en baterías se espera reduzca más pronto de lo esperado
- La forma de la demanda cambiará el panorama de negocios existente, lo cual requerirá energía distribuida



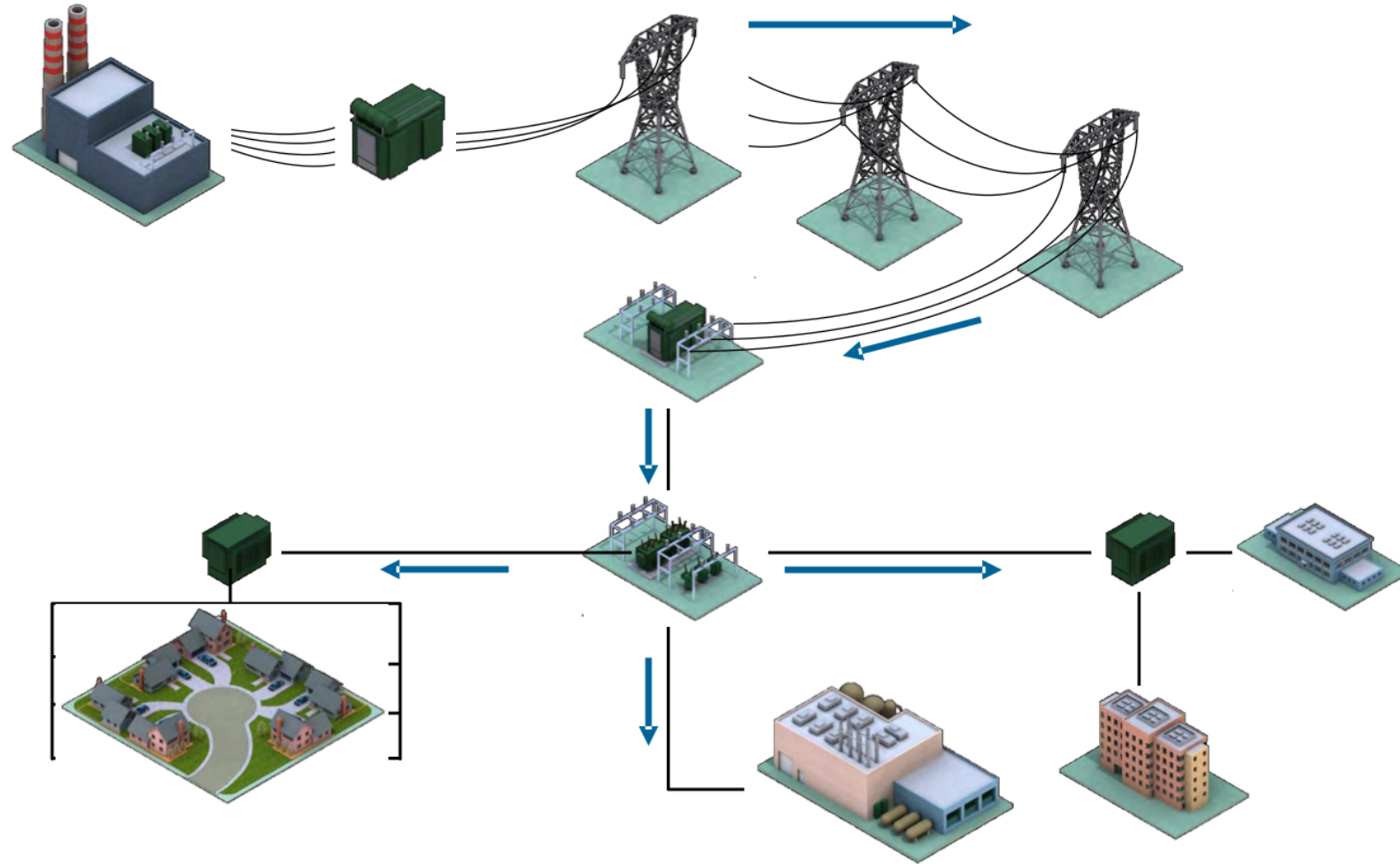
# Retos y oportunidades

## Preparando la red eléctrica para el futuro: flexibilidad, eficiencia y confiabilidad

- Actualmente se requiere de mayor flexibilidad para:
  - ✓ Mayor generación intermitente con renovables
    - Modificación en los patrones de consumo
    - Generación distribuida en los centros de carga (PV)
    - Cargadores de VE modifican los patrones de consumo
  - ✓ Envejecimiento de las líneas de transmisión y distribución
    - La infraestructura va envejeciendo y requiere reforzarla
    - Actualizaciones en un medio ambiente urbano puede ser complicado
  - ✓ Seguridad de la energía
    - Mejor resistencia contra el medio ambiente y otras amenazas
- Almacenamiento de energía es una opción poderosa
  - ✓ Incrementa la capacidad de utilización de infraestructura para generación, transmisión y distribución
  - ✓ Mejora la robustez de la red eléctrica



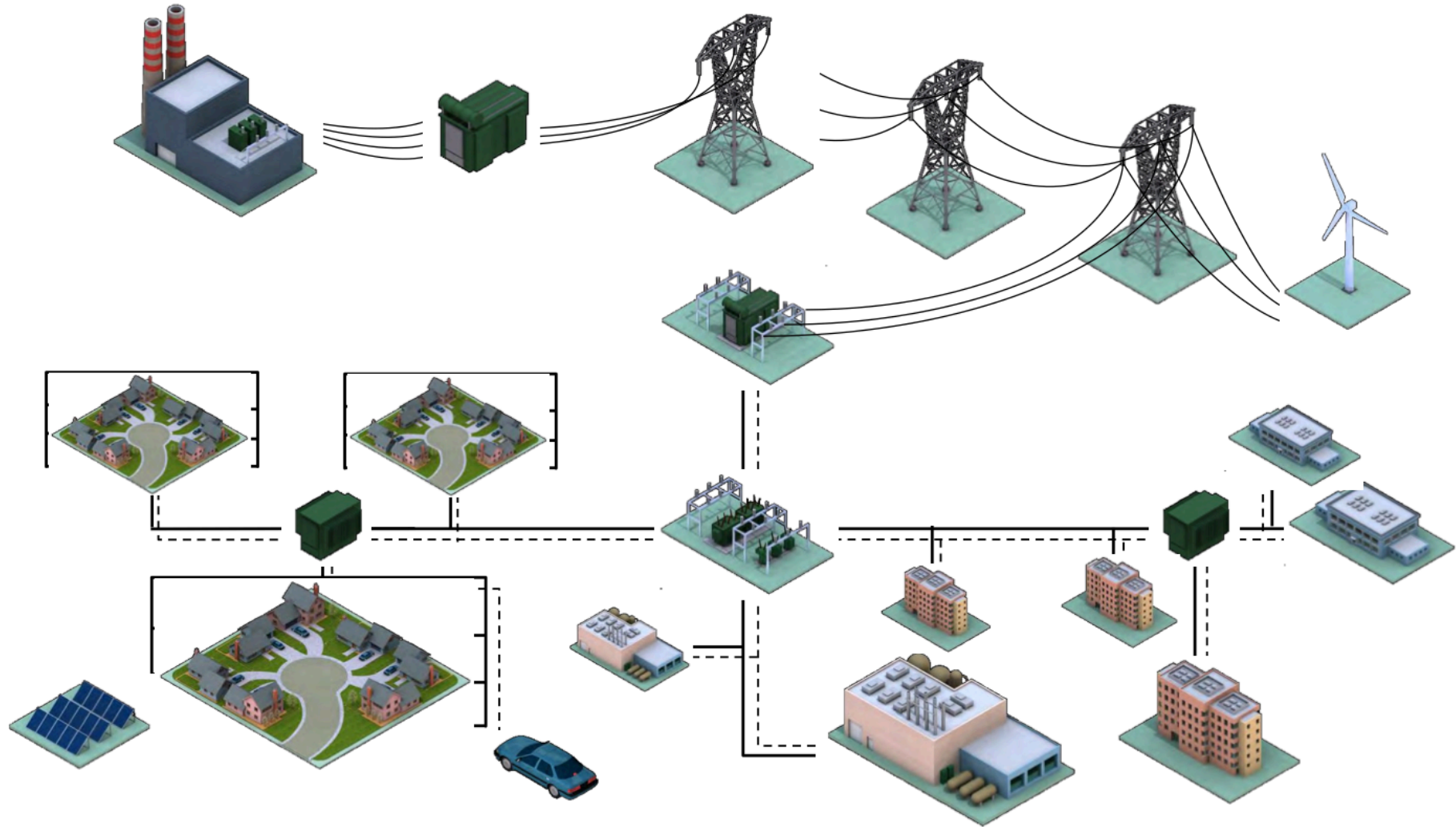
# Interconectando energía de baterías a la red eléctrica



SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA TRADICIONAL

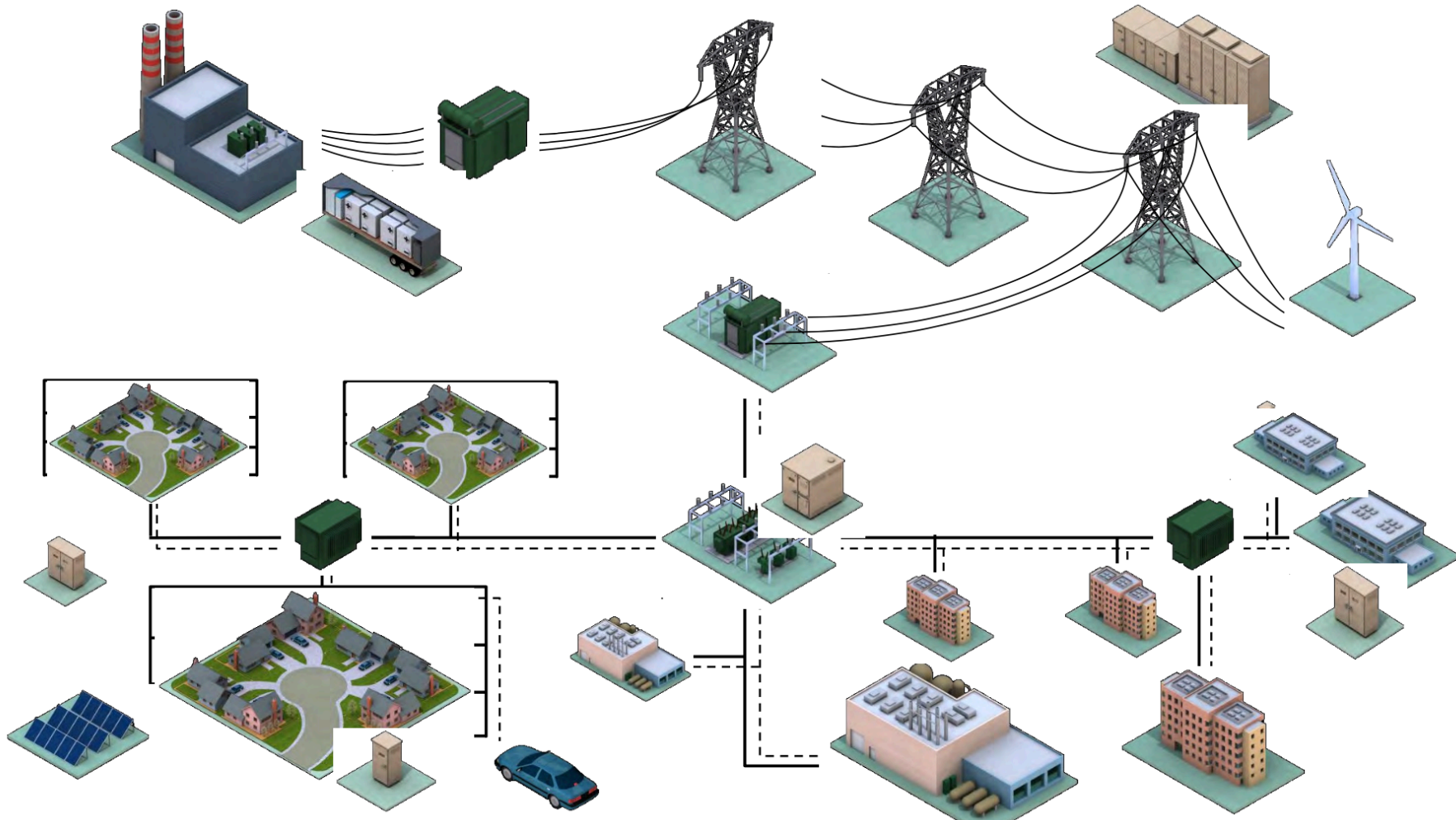


# Interconectando energía de baterías a la red eléctrica



**SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA CON RENOVABLES Y MAYOR CAPACIDAD DE CARGA**

# Interconectando energía de baterías a la red eléctrica



**SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA CON RENOVABLES, BESS INTERCONECTADO Y MAYOR CAPACIDAD DE CARGA**

# Funciones de un BESSS

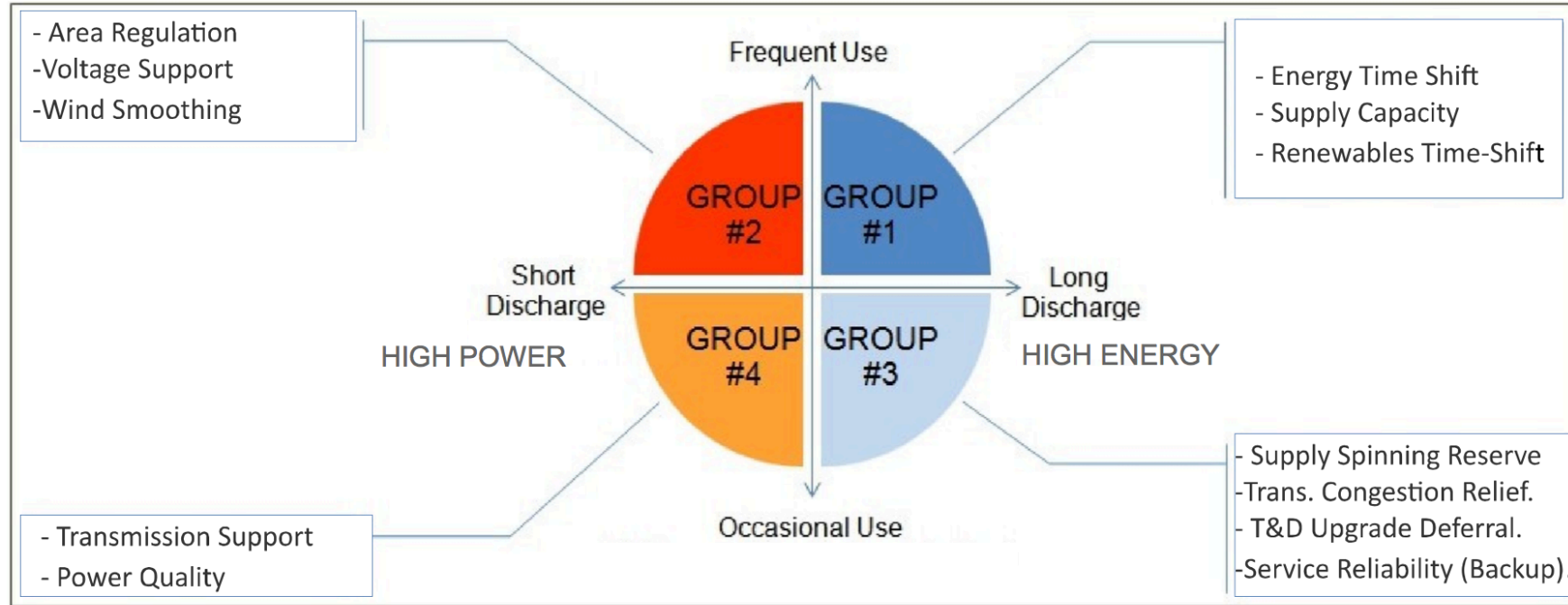


Figure 5. Four main Groups of Grid Applications for Energy Storage.

Table 1. General application requirements.

REQUIREMENTS	Long Discharge Frequent Use	Short Discharge Frequent Use	Long Discharge Infrequent Use	Short Discharge Infrequent Use
<b>Discharge Duration</b>	Hours	Minutes	Hours	Seconds
<b>Response Time</b>	Minutes	Seconds	Minutes	Seconds
<b>Discharge Depth</b>	Deep	Shallow	Deep	Shallow
<b>Min. Cycle Life</b>	Few 1000s	Tens of 1000 s	Few 100s	Few 100s
<b>Energy Efficiency</b>	Important	Important	Not Important	Not important

# Funciones de un BESSS



Category 1- Electric Supply	1. Electric Energy Time-Shift 2. Electric Suply Capacity
Category 2- Ancillary Services	3. Load Following 4. Area Regulation 5. Electric Supply Reserve Capacity 6. Voltage Support
Category 3- Grid System	7. Transmission Support 8. Transmission Congestion Relief 9. Transmission & Distribution (T&D) Upgrade Deferral 10. Substation On-site Power
Category 4- End User/Utility Customer	11. Time of Use (TOU) Energy Cost Management 12. Demand Charge Management 13. Electric Service Reliability 14. Electric Service Power Quality
Category 5. Renewables Integration	15. Renewables Energy Time-Shift 16. Renewables Capacity Firming 17. Wind Generation Grid Integration

**Categoría 1:** Suministro de energía

**Categoría 2:** Servicios auxiliares

**Categoría 3:** Red eléctrica

**Categoría 4:** Usuario final

**Categoría 5:** Integración de renovables

# Funciones de un BESSS

## Categoría 1: Suministro de energía

- 1. Energy Time-Shift (arbitrage):** significa que el almacenamiento es utilizado para introducir energía a la red eléctrica cuando ésta es cara y se almacena cuando es barata (relacionado con las horas pico de demanda).
- 2. Supply capacity:** Significa que el almacenamiento es utilizado para diferir el costo de nuevas instalaciones eléctricas o bien rentar capacidad de generación en el mercado eléctrico

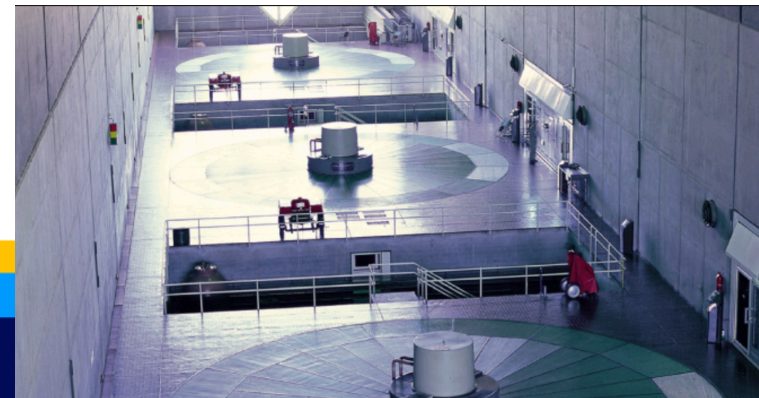
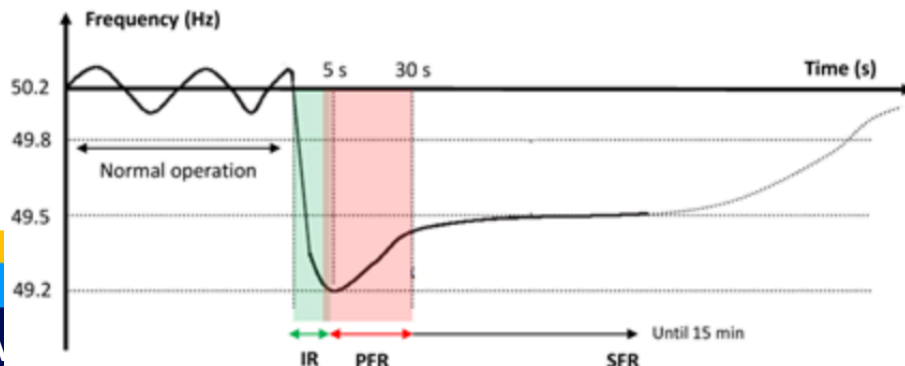




# Funciones de un BESS

## Categoría 2: Servicios auxiliares

- 3. Load following:** ajusta la potencia de salida del sistema de almacenamiento para obtener un balance entre la generación y la carga dentro de una región específica o área
- 4. Area regulation:** El sistema de almacenamiento puede seguir minuto a minuto fluctuaciones de carga y corregir fluctuaciones involuntarias en la generación. Básicamente es regulación de frecuencia



# Funciones de un BESSS



## Categoría 2: Servicios auxiliares

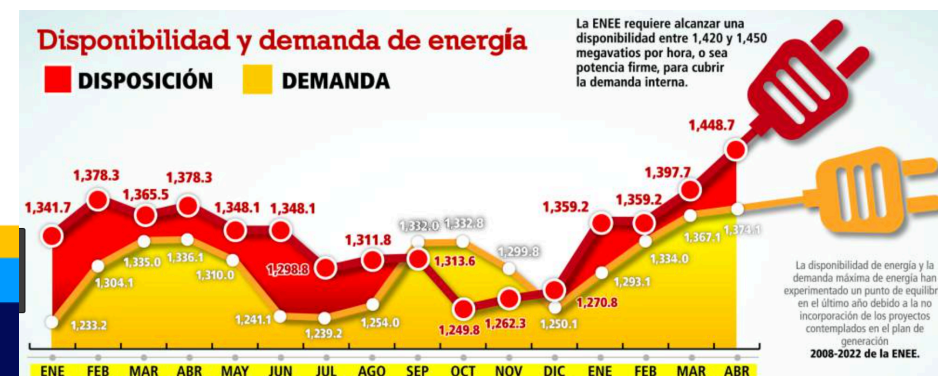
- 5. Supply spinning reserve:** Hace las veces de la reserva rodante, puede utilizarse cuando ocurre una pérdida inesperada de energía o un generador. La reserva rodante debe responder en máximo en 10 segundos para mantener la frecuencia.
- 6. Voltage support:** La función del BESS es mantener el voltaje de la red eléctrica regulado. El método más común es inyectando o absorbiendo potencia reactiva. El tiempo estándar de descarga se considera de 30 minutos.



# Funciones de un BESSS

## Categoría 3: Red eléctrica

7. **Transmission VAR support:** El sistema de almacenamiento de energía debe fortalecer las líneas de distribución y transmisión durante anomalías eléctricas tales como sags de voltaje, inestabilidad o resonancia subsíncrona.
8. **Transmission congestion relief:** Ocurre cuando hay escasez de capacidad de transmisión en periodos picos de demanda. El BESS será usado para evitar la congestión. La energía se almacena fuera de las horas pico y se libera en las horas pico





# Funciones de un BESSS

## Categoría 3: Red eléctrica

**9 y 10. Transmission or distribution upgrade deferral/Substation on Site Power:** El BESS es utilizado para aplazar la instalación o actualización de líneas o subestaciones en las líneas de transmisión o de distribución



# Funciones de un BESSS

## Categoría 4: Usuario final

**11. Retail TOU (Time of Use) energy charges:** El BESS es utilizado por el usuario final para desplazar o reducir su consumo en las horas pico y reducir el costo total de la electricidad.

**12. Retail demand charges:** El BESS es utilizado por el usuario final para reducir su consumo de potencia en el momento en que se demanda

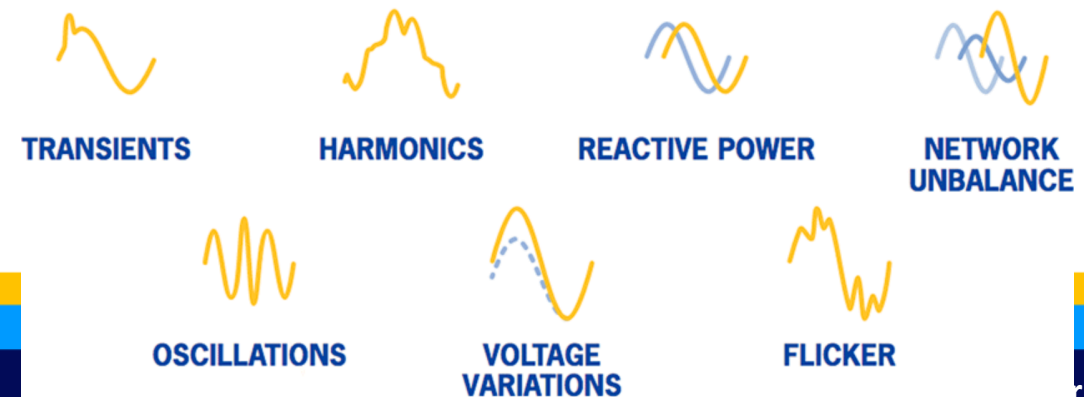


# Funciones de un BESSS

## Categoría 4: Usuario final

**13. Service reliability:** El BESS es utilizado como sistema de respaldo del sistema de potencia en el lado del medidor del usuario comercial o industrial.

**14. Power quality (utility or consumer):** El BESS es utilizado en el lado del usuario final, comercial o industrial para mejorar la calidad de la energía: sags y swells de voltaje, armónicos, factor de potencia, variaciones de voltaje (desbalance), interrupciones de corta duración, etc.



# Funciones de un BESSS

## Categoría 4: Integración de renovables

**15. Wind energy time shift (arbitrage):** Las fuentes renovables no son tan predecibles y no suelen alinearse con los patrones de consumo. Un BESS puede aportar una gran ventaja en la eficiencia de la energía renovable mejorando el impacto en la red de las renovables. Almacena cuando hay suficiente viento e inyecta energía cuando hay poco viento.

**16. Renewables capacity firming:** El objetivo del “capacity firming” es que la generación de energía renovable sea constante. El BESS puede ser usado entonces para almacenar durante horas pico de generación solar/eólica independiente de la demanda e inyectar energía cuando se reduce la generación renovable

# Funciones de un BESSS

## Categoría 4: Integración de renovables

**15. Wind energy smoothing:** Los BESS pueden ser utilizados para mitigar los efectos no deseables de una generación intermitente que puede ocurrir a lo largo del día. Por ejemplo, los sistemas aerogeneradores ya deben cumplir algunos requerimientos antes de interconectarse a la red.



# Funciones de un BESSS

## Potencias típicas

#	Type	Min.	Máx.
1	Electric Energy Time-shift	1 MW	500 MW
2	Electric Supply Capacity	1 MW	500 MW
3	Load Following	1 MW	500 MW
4	Area Regulation	1 MW	40 MW
5	Electric Supply Reserve Capacity	1 MW	500 MW
6	Voltage Support	1 MW	10 MW
7	Transmission Support	10 MW	100 MW
8	Transmission Congestion Relief	1 MW	100 MW
9	T&D Upgrade Deferral 50th percentile	250 kW	5 MW
10	Substation On-site Power	1.5 kW	5 kW
11	Time-of-use Energy Cost Management	1 kW	1 MW
12	Demand Charge Management	50 kW	10 MW
13	Electric Service Reliability	0.2 kW	10 MW
14	Electric Service Power Quality	0.2 kW	10 MW
15	Renewables Energy Time-shift	1 kW	500 MW
16	Renewables Capacity Firming	1 kW	500 MW
17	Wind Generation Grid Integration.	0.2 kW	500 MW

## Duración de la descarga

#	Type	Discharge Duration (hr)	Min.	Máx.
1	Electric Energy Time-shift		2	8
2	Electric Supply Capacity		4	6
3	Load Following		2	4
4	Area Regulation		15 min.	30 min.
5	Electric Supply Reserve Capacity		1	2
6	Voltage Support		15 min.	1
7	Transmission Support		2 s	5 s
8	Transmission Congestion Relief		3	6
9	T&D Upgrade Deferral 50th percentile		3	6
10	Substation On-site Power		8	16
11	Time-of-use Energy Cost Management		4	6
12	Demand Charge Management		5	11
13	Electric Service Reliability		5 min.	1
14	Electric Service Power Quality		10 s	1 min
15	Renewables Energy Time-shift		3	5
16	Renewables Capacity Firming		2	4
17.1	Wind Generation Grid Integration. (short duration)		10 s	15 min.
17.2	Wind Generation Grid Integration. (long duration)		1	6

# Retos de diseño y control

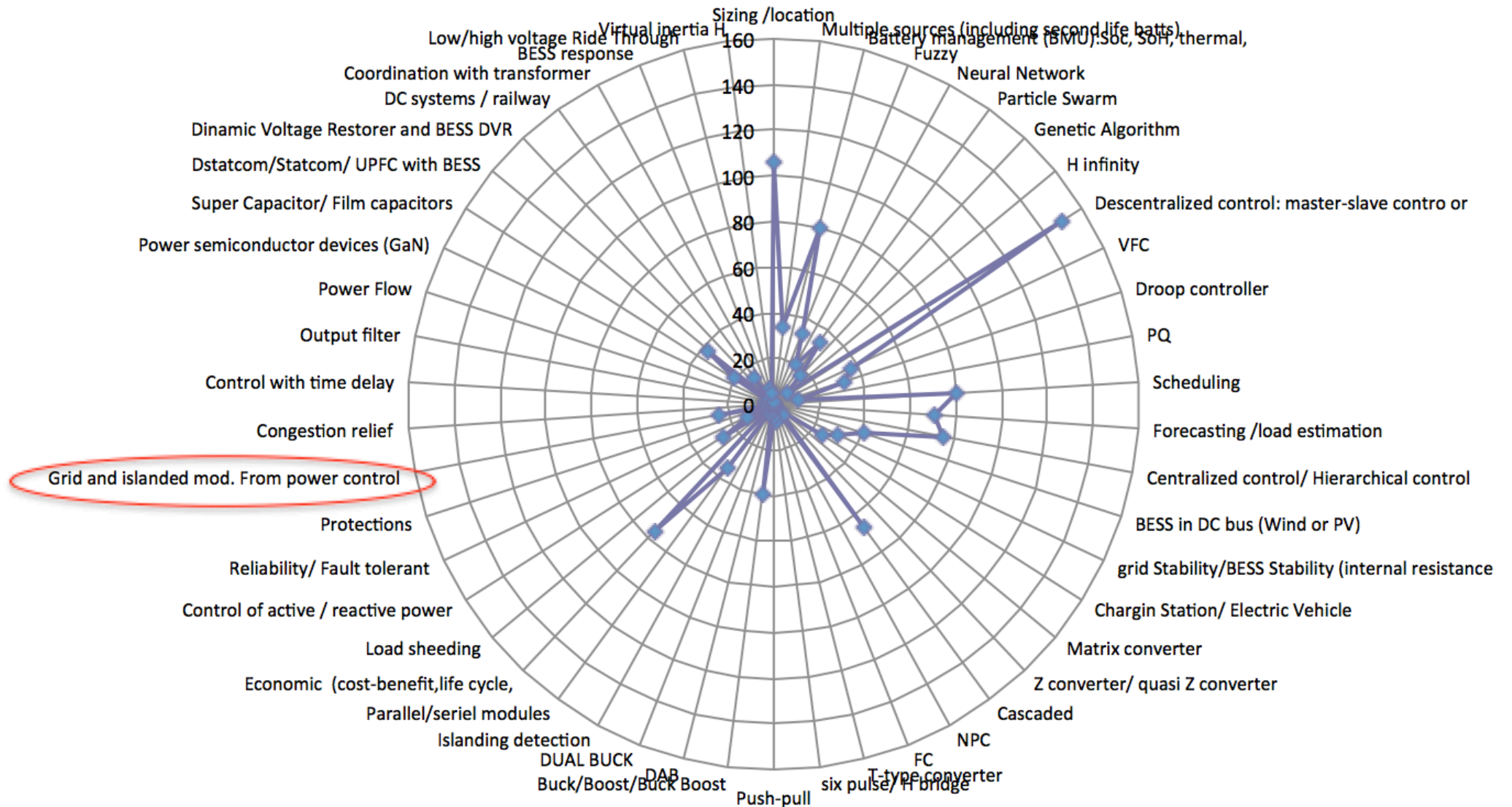
## Hallazgos de la vigilancia tecnológica:

- 1,138 artículos analizados
- Uso de 14 bases de datos
- 50 tópicos generales de investigación
- 20 de control y operación
- 33 tópicos de convertidores de electrónica de potencia



# Retos de diseño y control

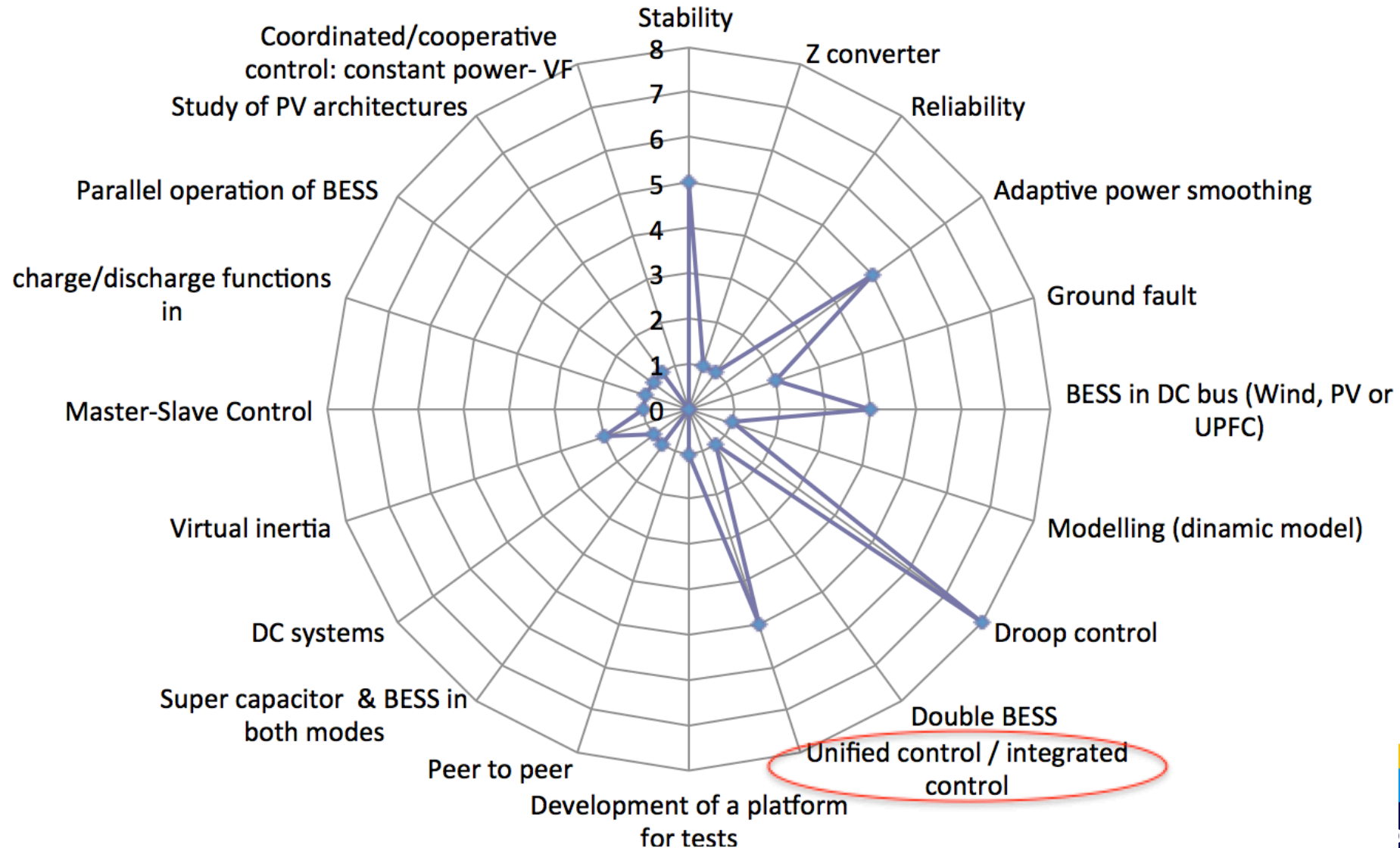
## Hallazgos: 50 tópicos generales de estudio





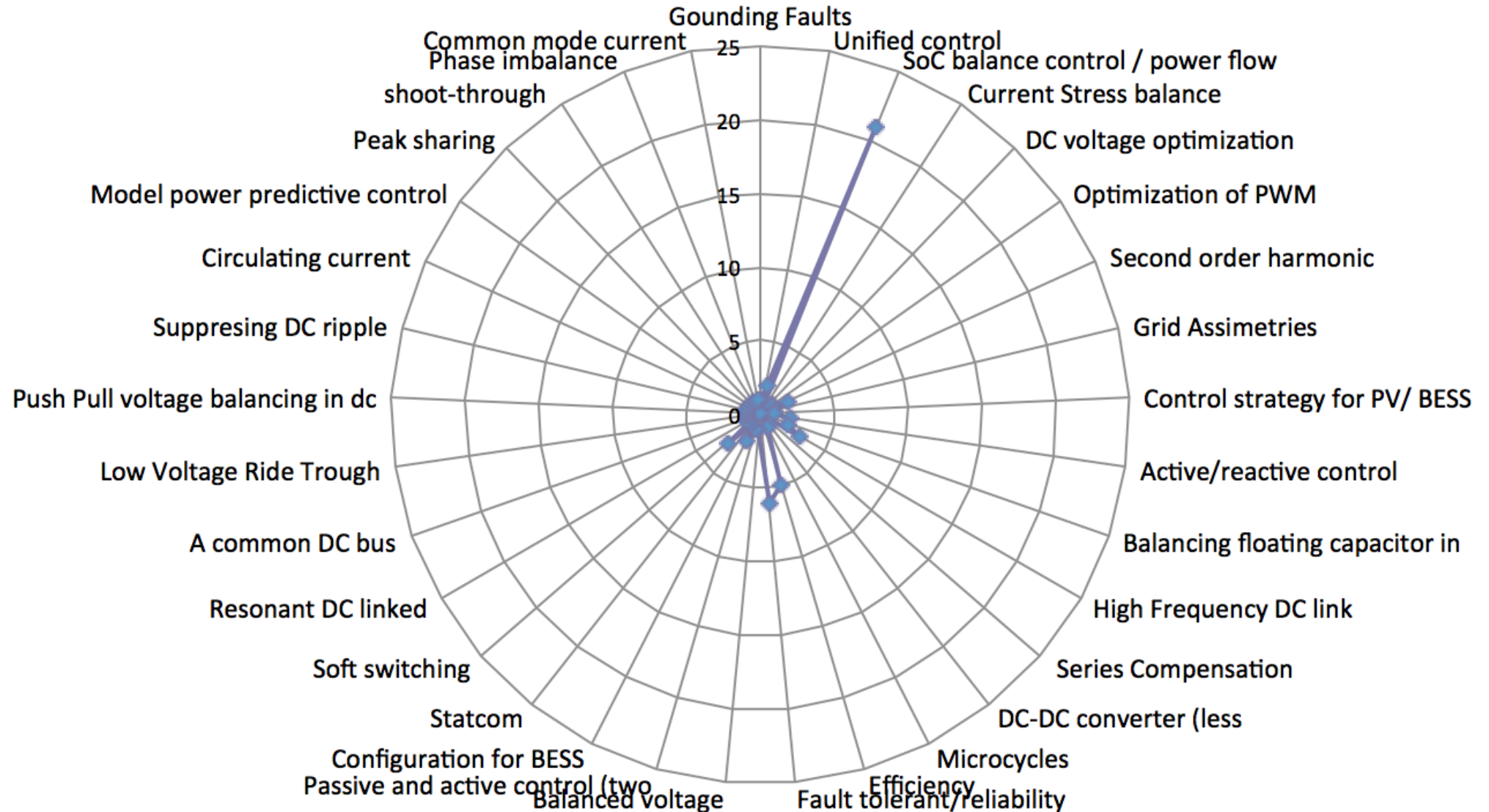
# Retos de diseño y control

## Hallazgos en modo isla y modo interconectado



# Retos de diseño y control

## Hallazgos de convertidores conectados en cascada



# Retos de diseño y control

## Aplicaciones seleccionadas:

- Regulación de frecuencia
- Energía eléctrica diferida
- Modo isla: UPS

## Consideraciones para la selección de topologías:

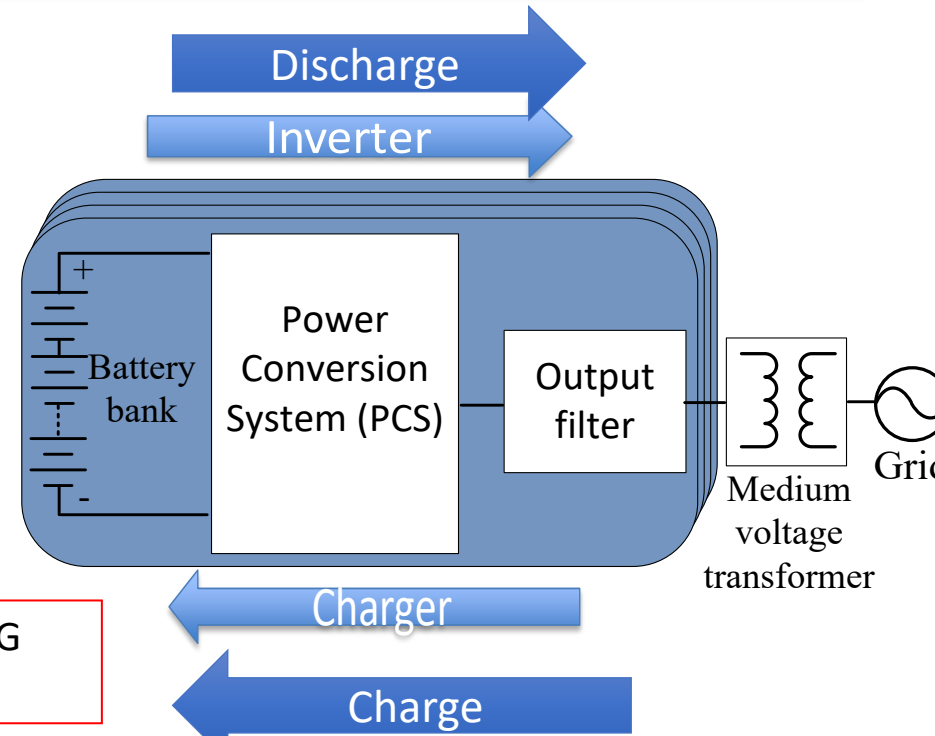
- Potencia de 100 kW a 250 kW
- Modularidad
- Simplicidad de arquitectura y de control
- Capacidad de sobrecarga: duty III (150% 2s, 125% 10s, 110% 1hr)
- Rizo de voltaje y de corriente
- Capacidad elevadora y reductora
- Bidireccionalidad (modo inversor y modo cargador)
- Confiabilidad

# Retos de diseño y control

<p><b>NEMA PE 5</b> (Utility Type Battery Chargers)</p>	<p><b>UL-1741</b> (Inverters, Converters, Controllers ...) <b>IEEE 929</b> (...Interface of Photovoltaic (PV) Systems) <b>IEC 60146-1-1</b> (General requirements and line commutated converters)</p>	<p><b>IEEE 1547 series</b> (Interconnecting Distributed ..) <b>IEEE 519</b> (..requirements for harmonic ...)</p>
---	---	---

- Ten standards
- Five guides

- 1) Voltage range
- 2) Voltage ripple: 2%
- 3) Current ripple: 5% of rated current
- 4) Equalizing voltage
- 5) Floating voltage

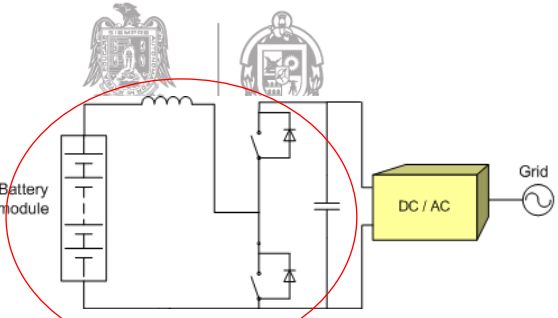


BATTERY BANK SIZING METHOD

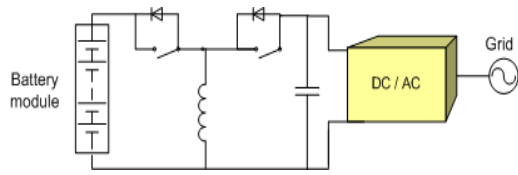
- 1) Nominal voltaje: 480 V
- 2) Voltage range  $\pm 10\%$
- 3) Frequency 60 Hz
- 4) Frequency range:  $\pm 5$  Hz
- 5) Duty-class: 110 kW (1 h)
- 6) 125 kW (10m) and 150 kW (10 s)
- 7) Efficiency > 90%
- 8) TDD: 5%
- 9) THD: 5%
- 10) Response time
- 11) Islanding and grid- connected operating modes: Voltage and current modes.

Fig. 7. Defined BESS requirements in this thesis.

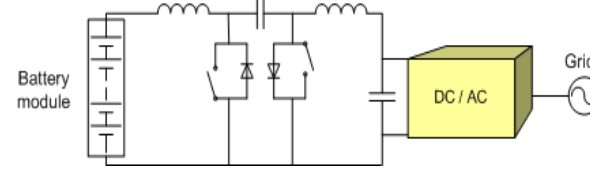
# Retos de diseño y control



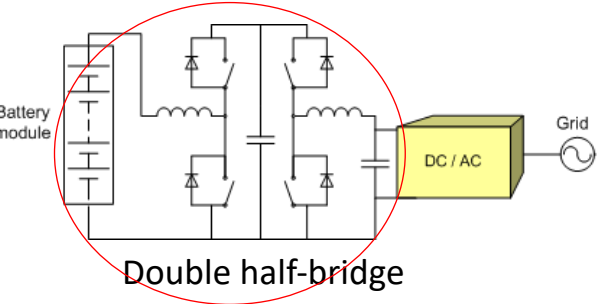
Half-bridge



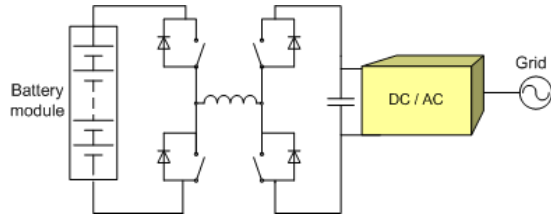
Buck-boost



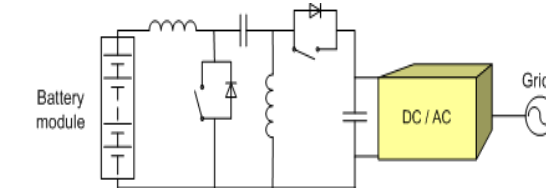
Cúk



Double half-bridge

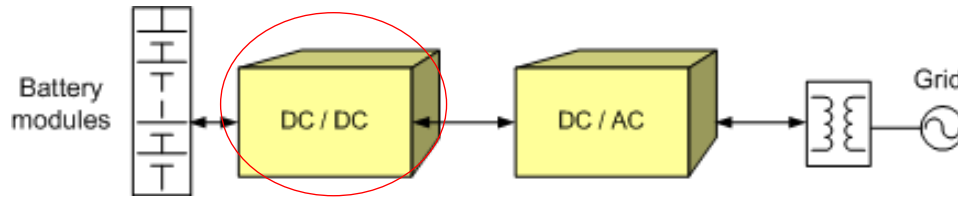


Cascaded Buck-boost

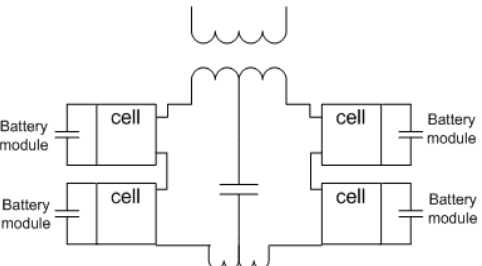


Sepic-Luo

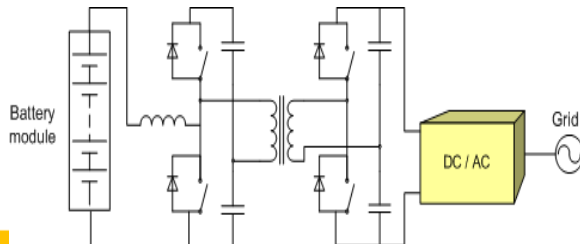
BESS power converter design: topology selection



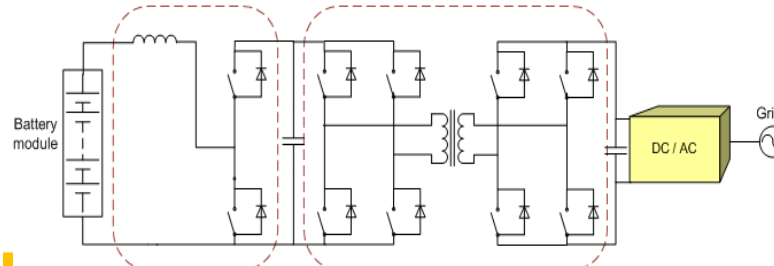
EVALUATION OF MAIN CHARACTERISTICS



Push-pull

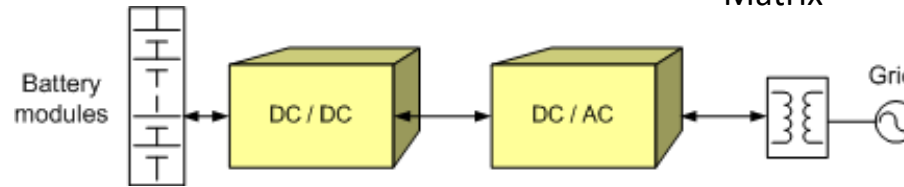
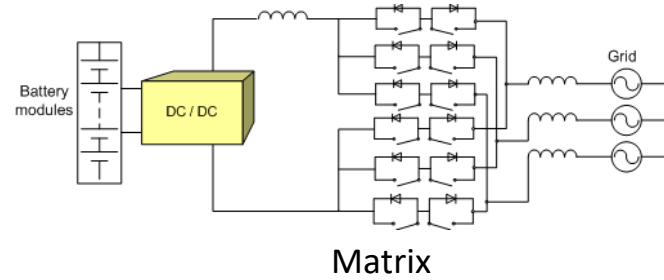
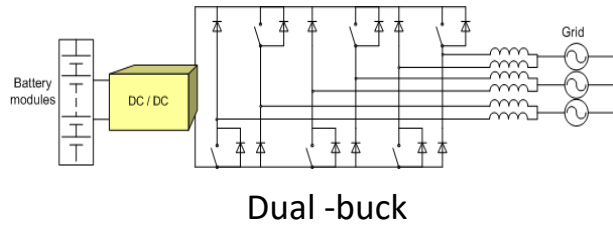
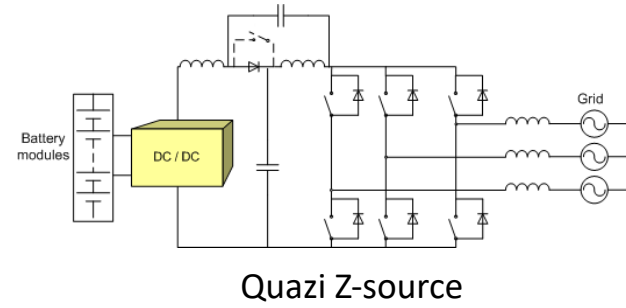
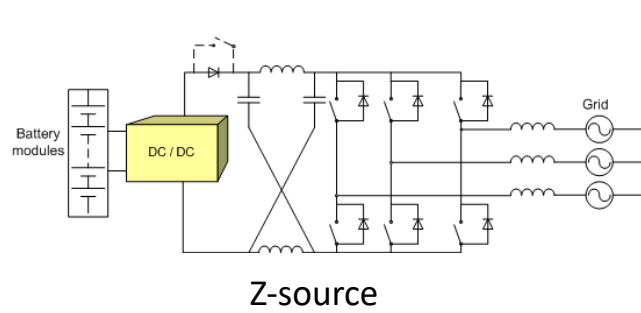
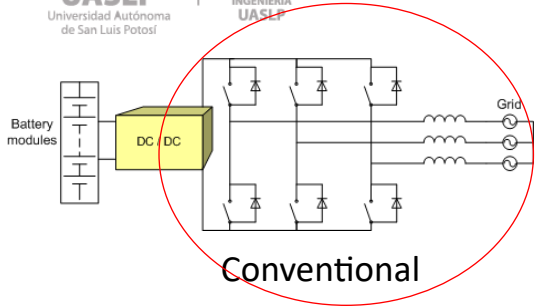


Isolated half-bridge



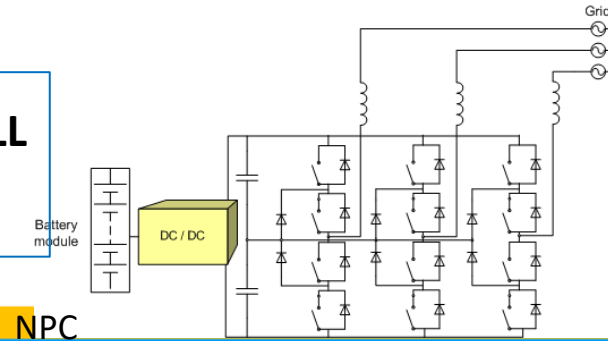
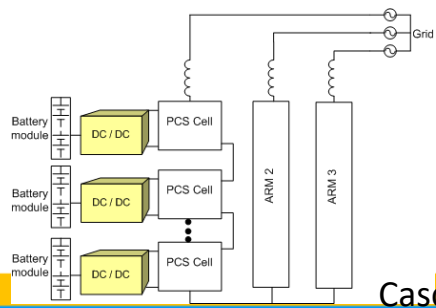
Isolated full-bridge

# Retos de diseño y control



BESS power  
converter design:  
topology selection

**GENERAL ASSESSMENT TO FULFILL  
WITH MAIN REQUIREMENTS**

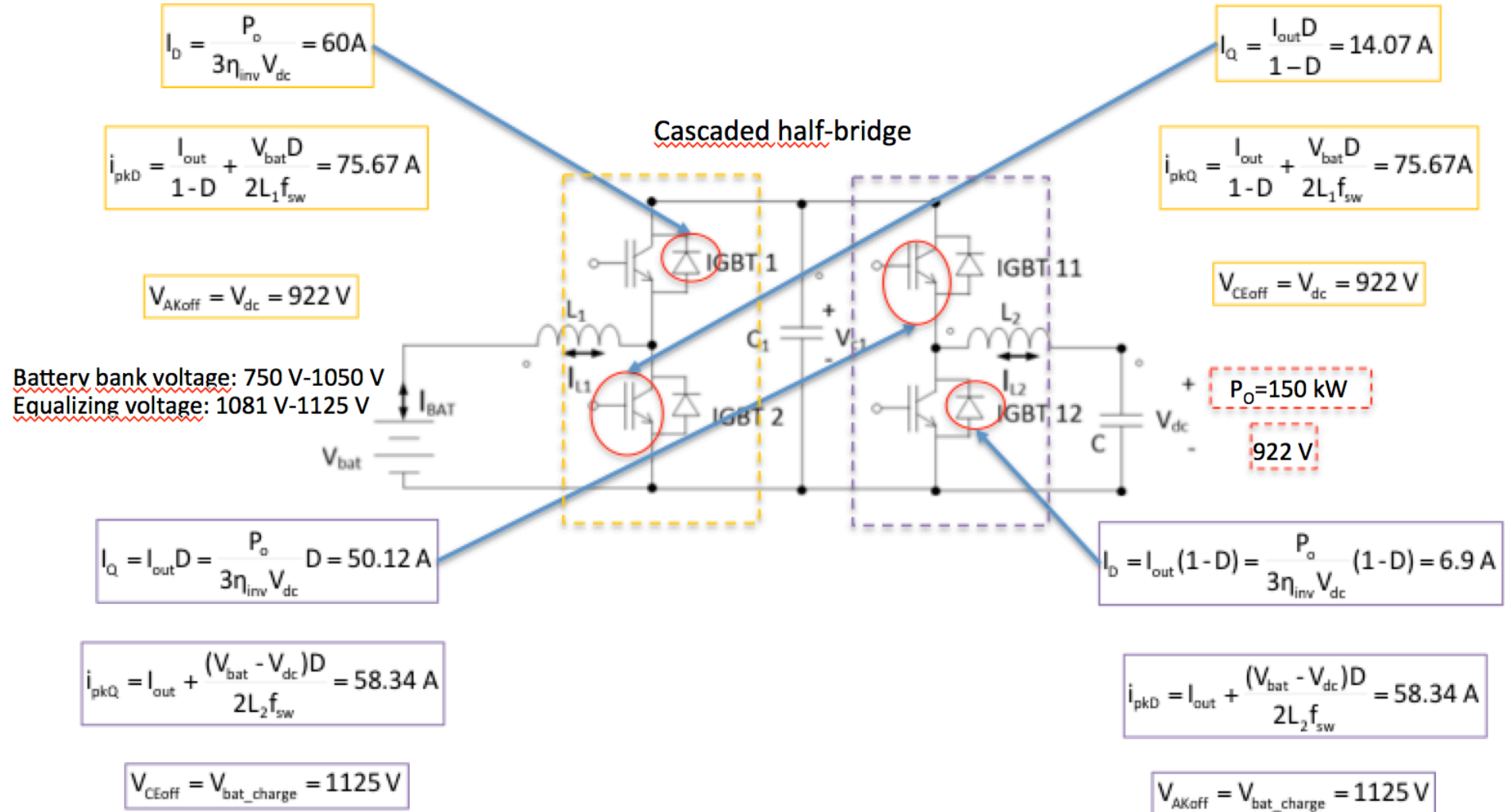


# Retos de diseño y control

Parameters	Non-isolated						Isolated		
	Half-bridge	Double half bridge	Buck-boost	Cascaded buck-boost	Cúk	Sepic-Luo	Push-pull	Half-bridge	Full-bridge
Simple architecture	3	2	3	2	2	2	1	2	1
Control simplicity	3	3	3	3	2	2	1	3	2
Efficiency	3	3	2	3	1	2	2	3	3
Interleaved ease--> increase efficiency	3	2	3	2	1	1	1	2	2
Buck+boost to grid*	2	3	1	3	1	1	2	2	2
High boost capability--> available to use transformer	√	√	√	√	√	√	√	√	√
Fault ride through / Isolate overload	0	0	0	0	0	0	3	3	3
Oversizing for overload	0	2	1	2	1	1	1	1	1
Smooth input current and input voltage --> batteries (SoC control) and reduced EMI	3	2	3	2	1	1	2	2	2
Smooth input voltage--> batteries	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes
Input filter	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Output filter	2	2	0	1	2	2	0	2	2
Reliability	2	3	2	2	3	2	3	2	2
Maximum power module	3	2	3	2	2	2	1	2	2
	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	250, 500, 750, 1000 kW [2], 40 kW [3]	75 kW [5]	20 kW [1], 75 kW [5]	20 kW [1], 75 kW [5]	75 kW [5]	75 kW [5]	250 kW [6]	200 kW [4]	200 kW [4]
Total	24	24	21	22	16	16	17	24	22

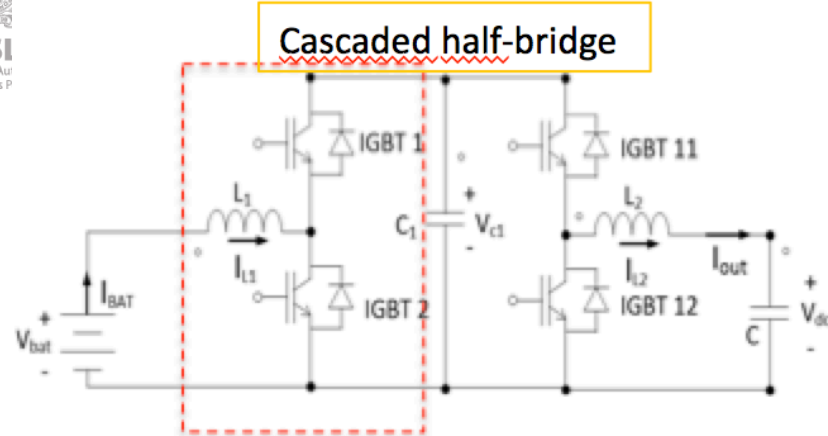
General assessment

# Retos de diseño y control





# Retos de diseño y control



- Battery voltage (input voltage): 750-907 V
- Blocking Voltage: 1700 V
- DC bus voltage (output voltage): 922 V
- Duty Cycle: 0.18-0.016
- Switching Frequency: 12060 Hz
- Input Inductance: 0.0037 H
- Output Current: 41.85 A (nominal current in each interleaved boost converter)

$$I_{out} = \frac{P_o}{3\eta_{inv} V_{dc}} = \frac{110 \text{ kW}}{3(0.95)(922 \text{ V})}$$

- Load cycle: 110 kW– 125 kW (2 m)—150 kW (10 s) at the highest and the lowest input voltage: 750 V- 907 V
- Ambient temperature: 25 °C

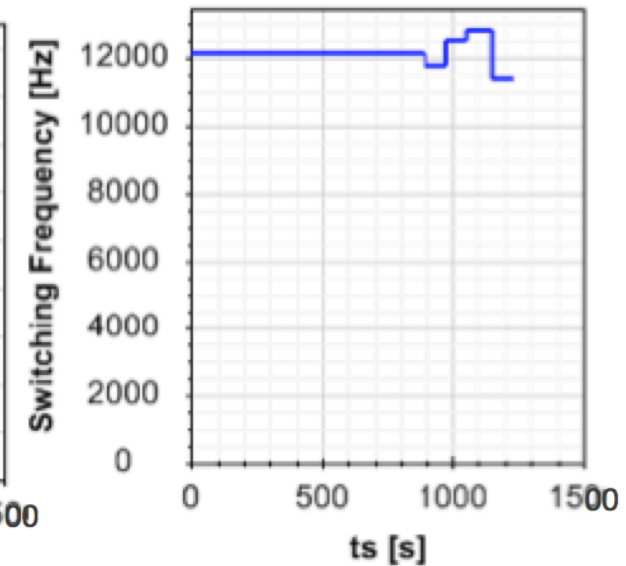
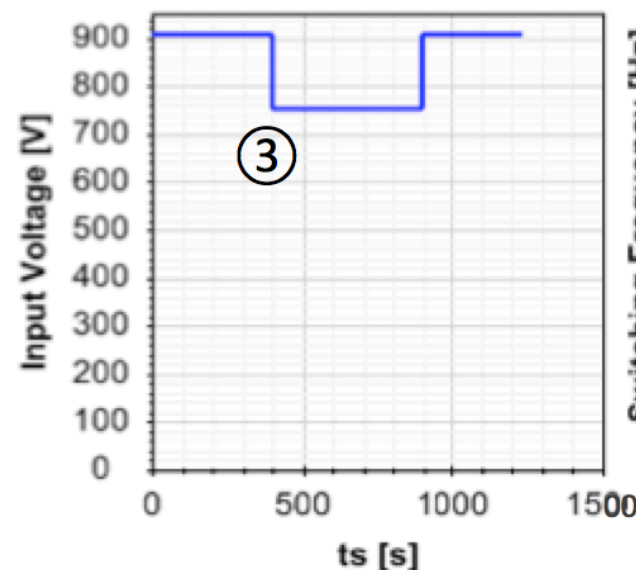
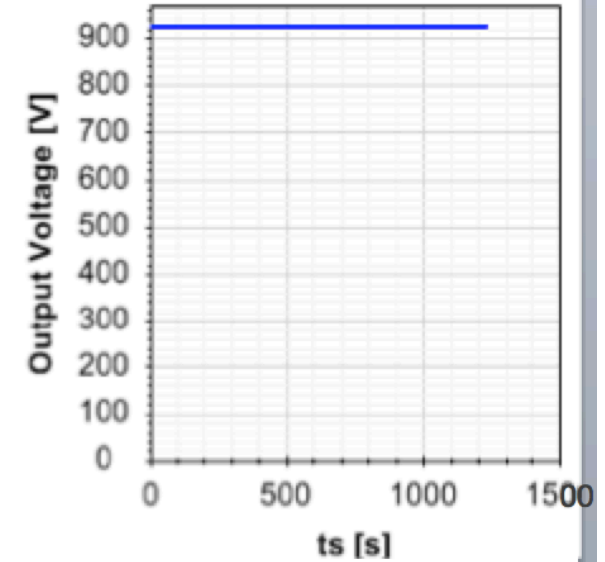
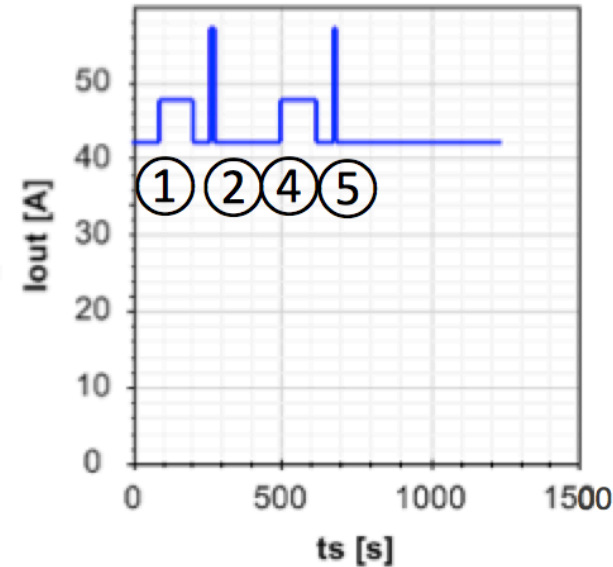


Fig 40. Load cycle conditions: Output current, output voltage, input voltage, and switching frequency.

# Retos de diseño y control

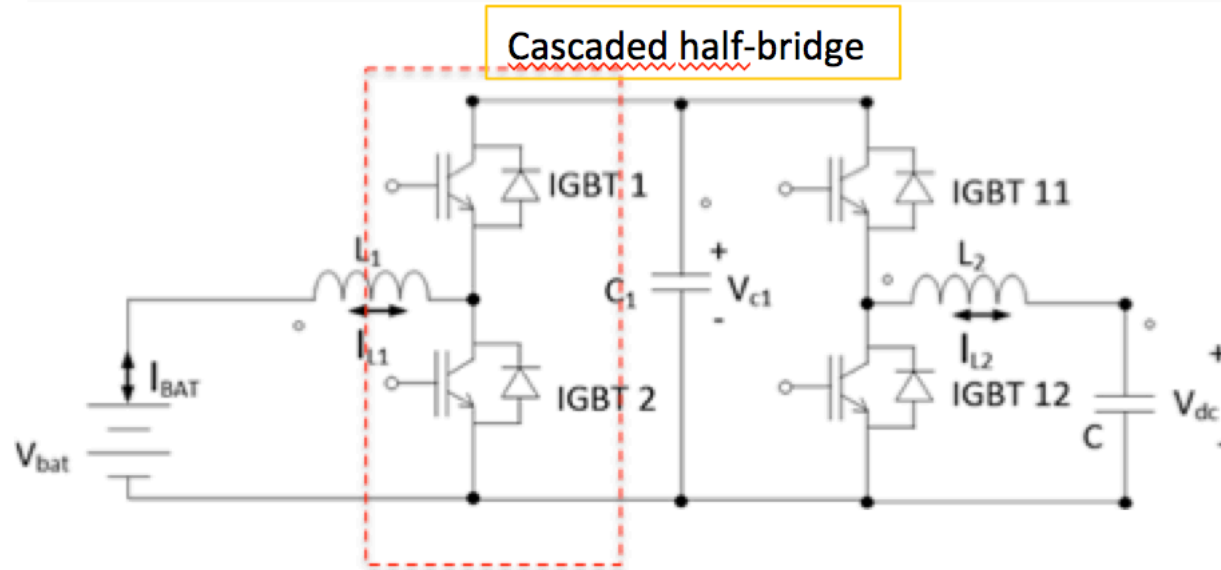


Table. Power semiconductors possible options.

DEVICE	Module parameters		IGBT parameters				Diode parameters			
	$V_{CES}$ [V]	$I_{CNOM}$ [A]	$V_{CEsat}$ [V]	$E_{on}+E_{off}$ , 125°C [mWs]	$R_{thJU}$ [°K/W]	$T_{vjmax}$ [°C]	$V_F$ , 25°C [V]	$E_{rec}$ , 125°C [mWs]	$R_{thJU}$ [°K/W]	$T_{vjmax}$ [°C]
FF200R17KE4	1700	200	1.95	129	0.155	150	1.8	45	0.207	150
FF300R17KE4	1700	300	1.95	176	0.116	150	1.8	58	0.181	150
FF450R17IE4	1700	450	2.00	340	0.068	150	1.85	104	0.127	150

# Retos de diseño y control

## FF200R17KE4

### IGBT

Eon+Eoff,125°C 129.00 mWs

RG,on 3.6 Ω

RG,off 3.6 Ω

RthJC 0.120 °K/W

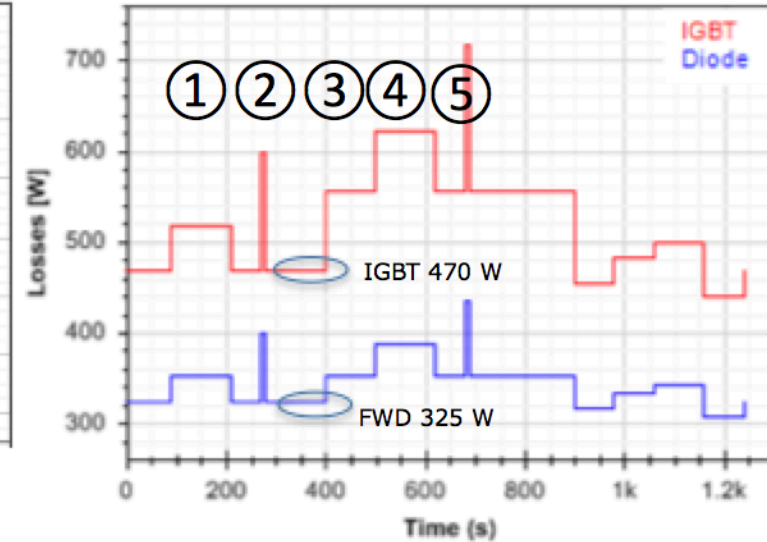
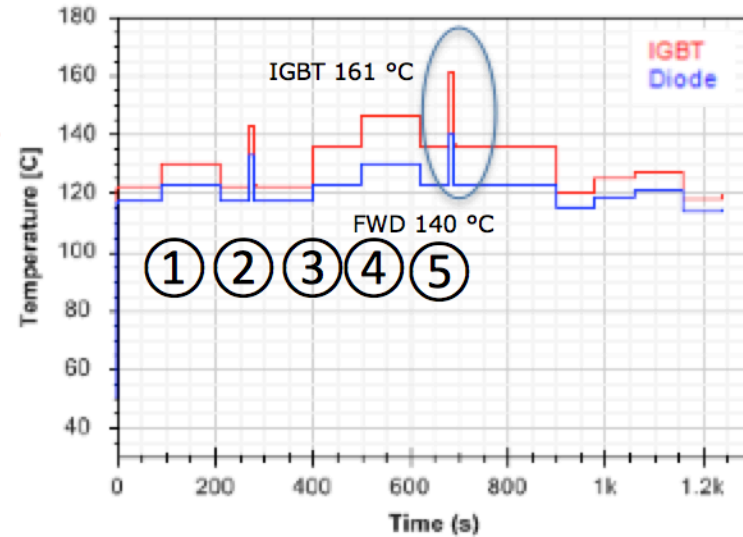
RthCH 0.0350 °K/W

### DIODE

Erec,125°C 45.00 mWs

RthJC 0.160 °K/W

RthCH 0.0470 °K/W



## FF300R17KE4

### IGBT

Eon+Eoff,125°C 176.00 mWs

RG,on 2.4 Ω

RG,off 2.4 Ω

RthJC 0.0830 °K/W

RthCH 0.0330 °K/W

### DIODE

Erec,125°C 58.00 mWs

RthJC 0.130 °K/W

RthCH 0.0510 °K/W

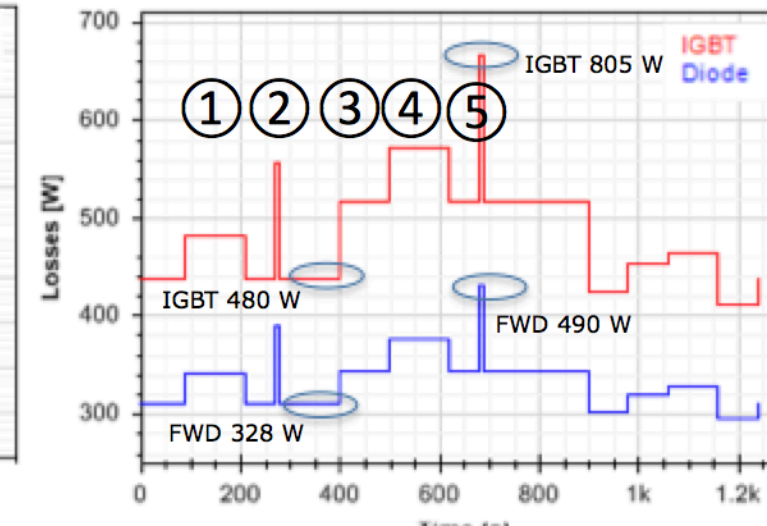
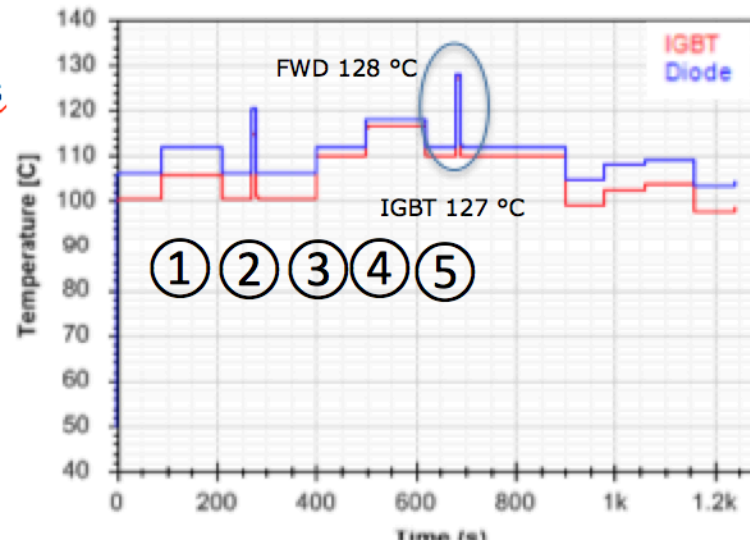


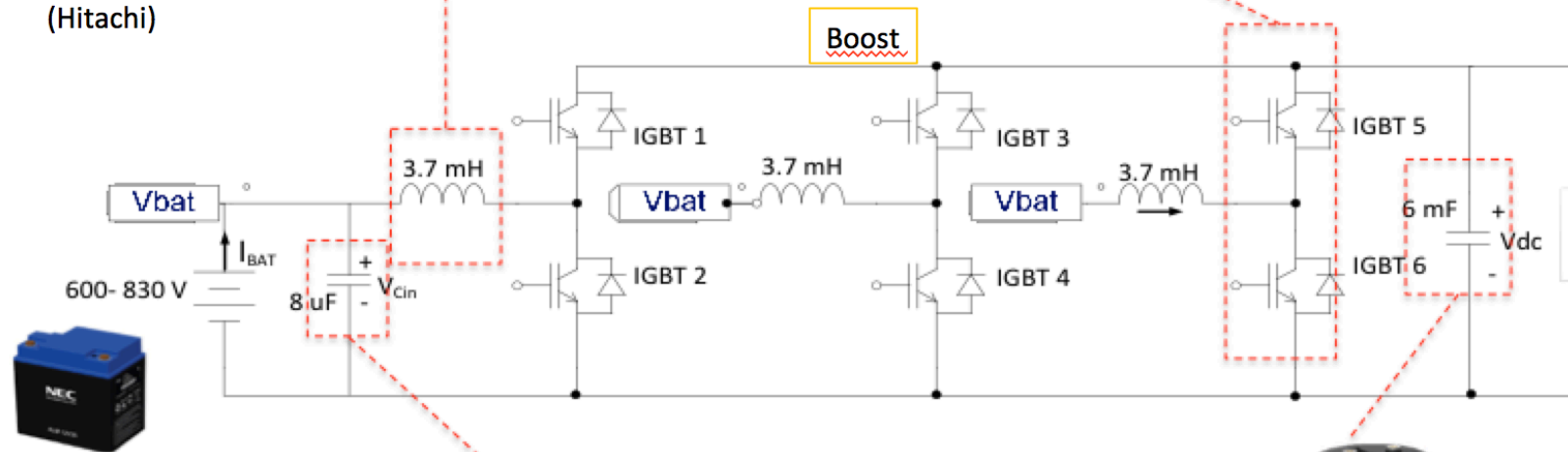
Fig 41. Temperature and power losses per phase for the FF200R17KE4 and FF300R17KE4 IGBT devices. Waveforms obtained in IPOSIM by Infineon® with a switching frequency of 12060 Hz, output voltage of 922 V, input voltage from 750 V to 907 V, and duty cycle requirement.

# Retos de diseño y control

CORE  
Iron-based  
amorphous Alloy-  
SA1  
4 cores-AMCC673  
(Hitachi)



IGBT  
FF300R17KE4  
(Infineon)  
1700 V- 300 A



CAPACITOR  
Polypropylene  
BLC080J112B4A  
Cornell Dubilier  
1-8 µF  
1100 Vdc



CAPACITOR  
Polypropylene  
947D641K132DLRSN  
Cornell Dubilier  
10 capacitors of 640 µF  
1300 Vdc



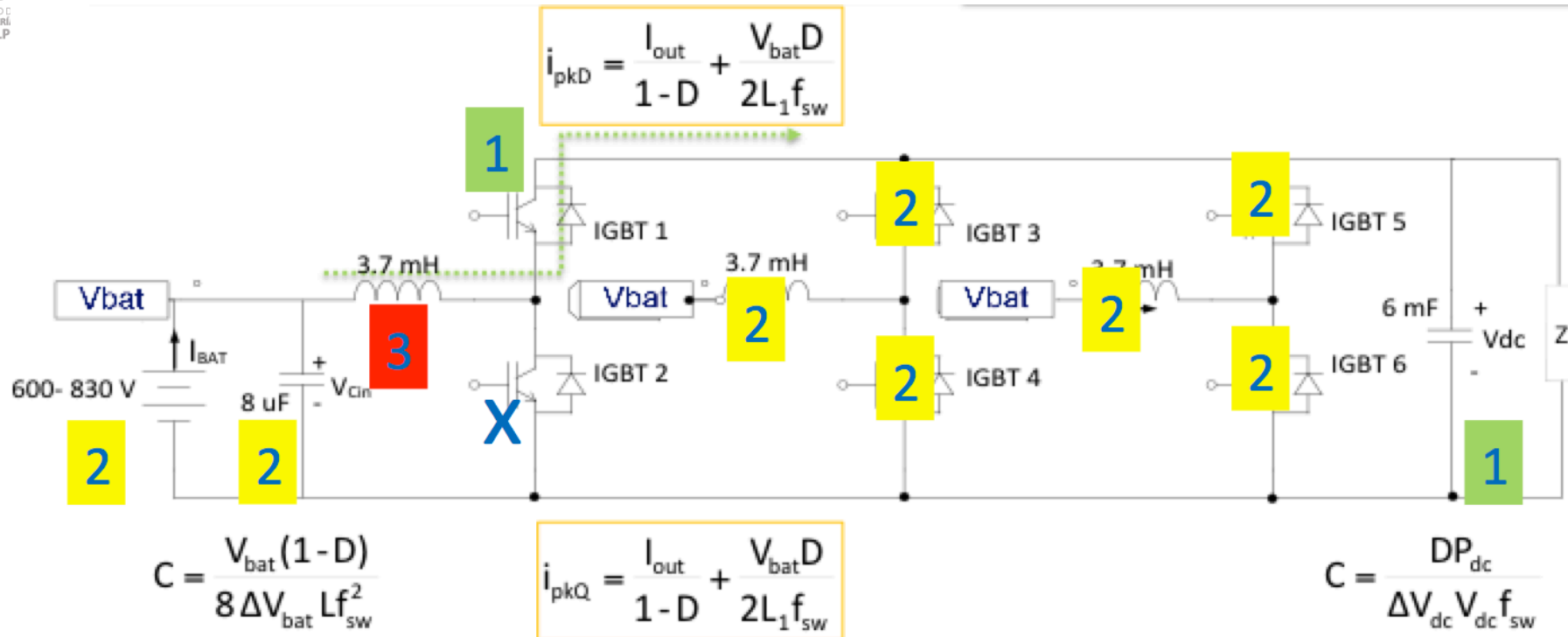
Diseño de convertidores

Análisis de modos de fallas

Análisis de propagación de fallas

Figuras de mérito

# Retos de diseño y control

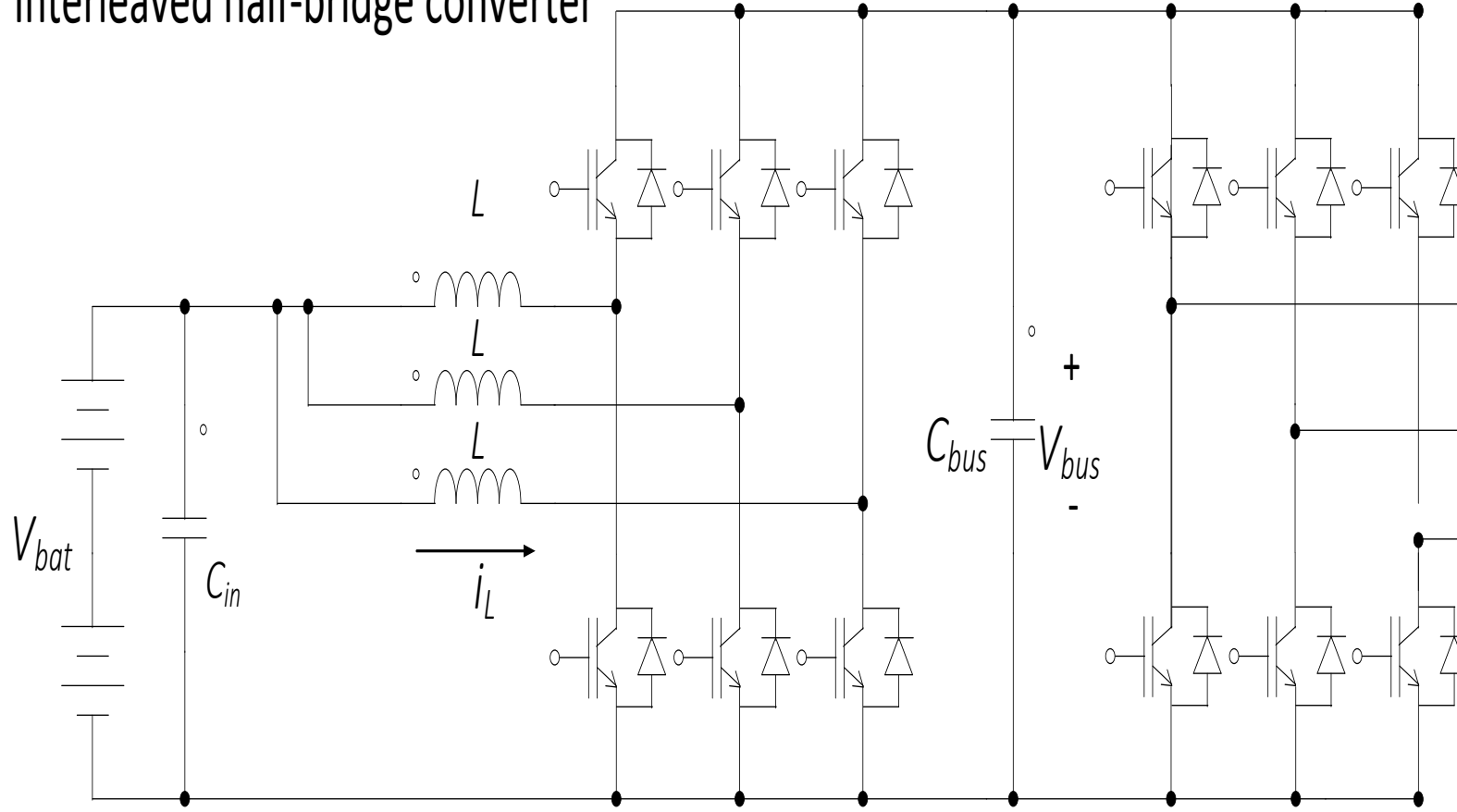


X	Fault location
3	Destructive effect
2	Could be damaged
1	With effect but no damage
0	No effect and no damage

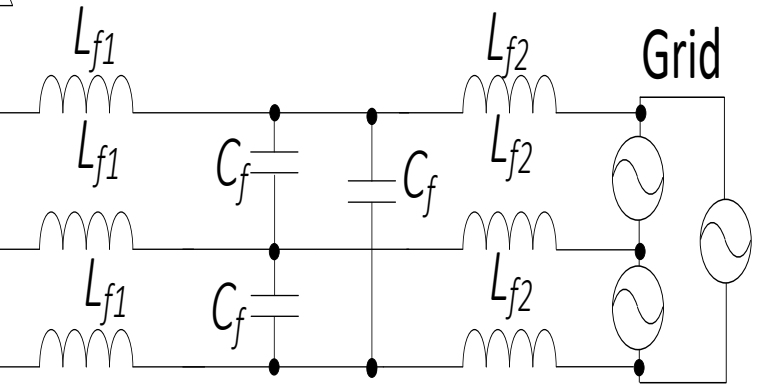
# Retos de diseño y control

## Topología propuesta

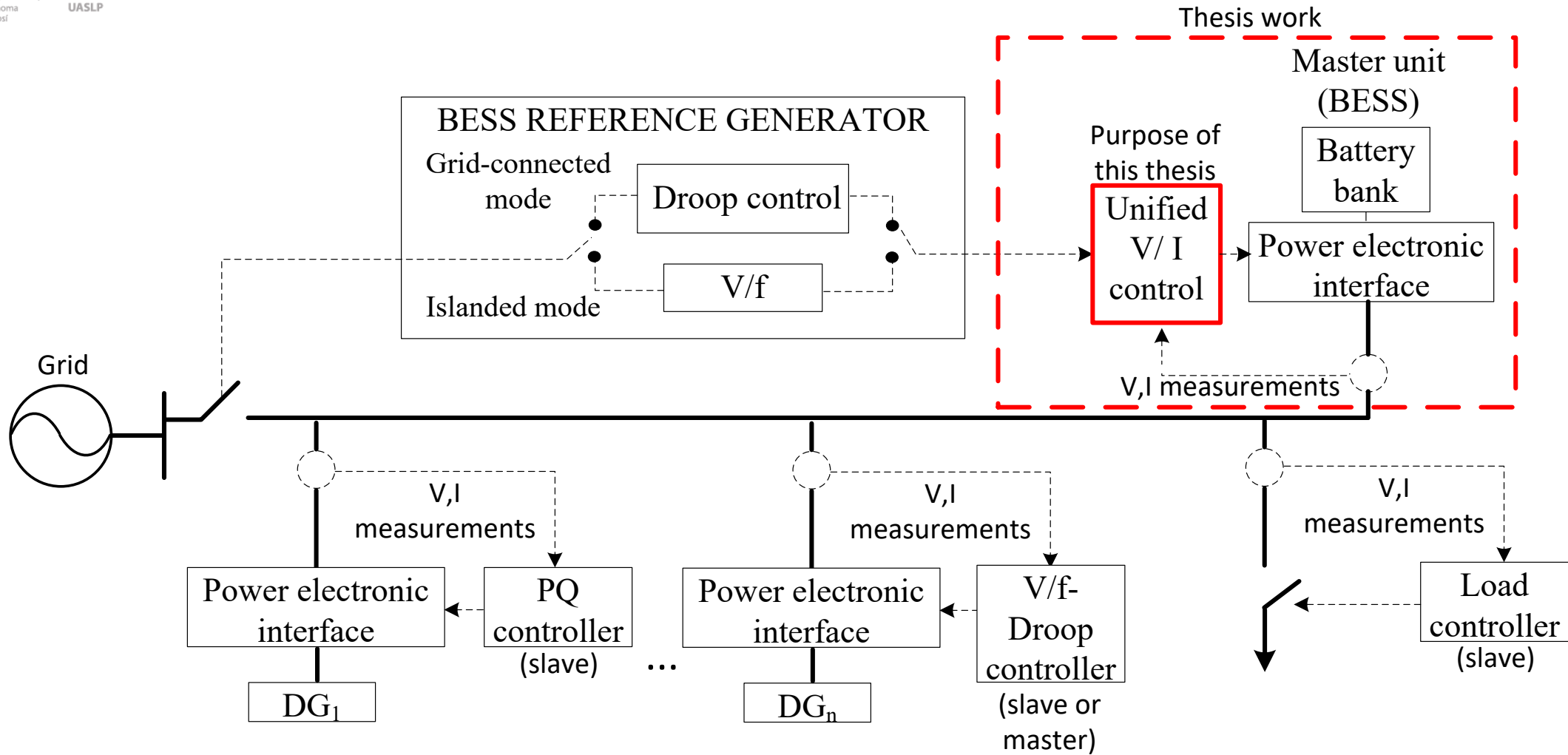
Interleaved half-bridge converter



Three-phase LCL-filter dc-ac converter



# Retos de diseño y control



## Summary of design

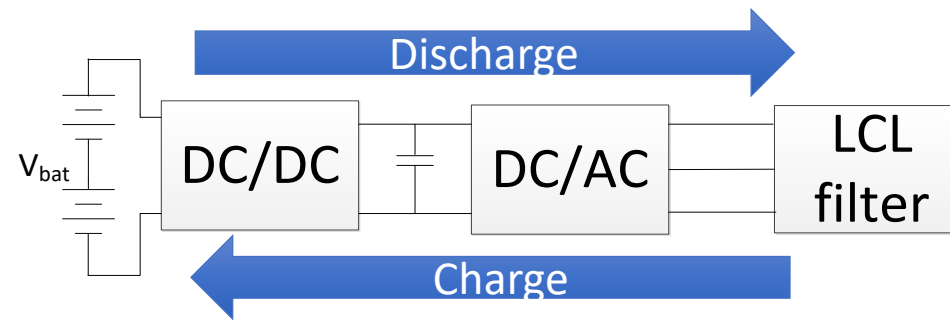
# Retos de diseño y control

### Interleaved half-bridge converter

- No linear model
- Current control mode
- Input-output feedback linearization
- Integrator to withstand uncertainties

### Three-phase PWM LCL-filter inverter

- Linear model
- Voltage control mode
- Current control mode
- Butterworth response
- State feedback
- Integrator to withstand uncertainties



### Interleaved half-bridge converter

- Linear model
- Current control mode
- Voltage control mode
- Butterworth response
- State feedback
- Integrator to withstand uncertainties

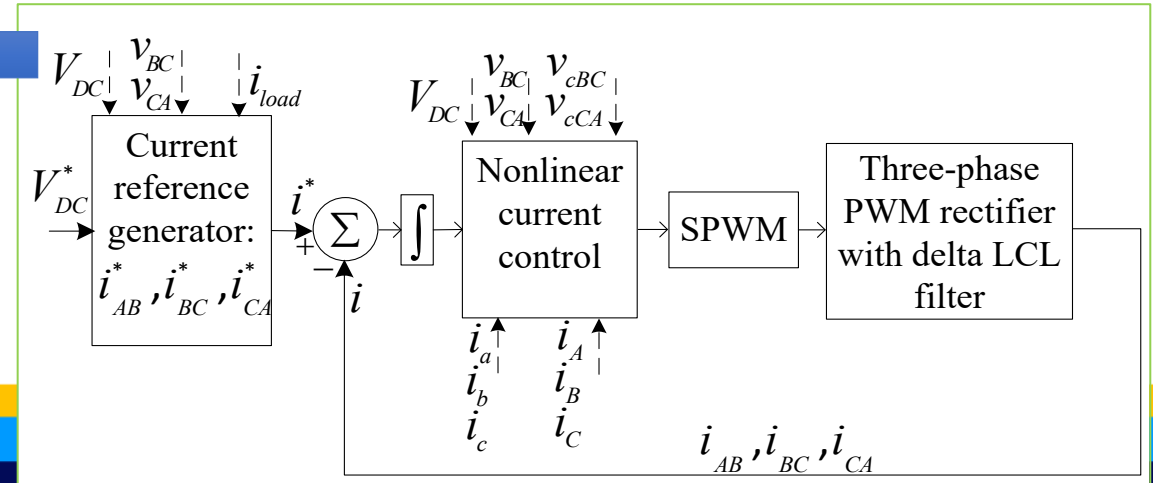
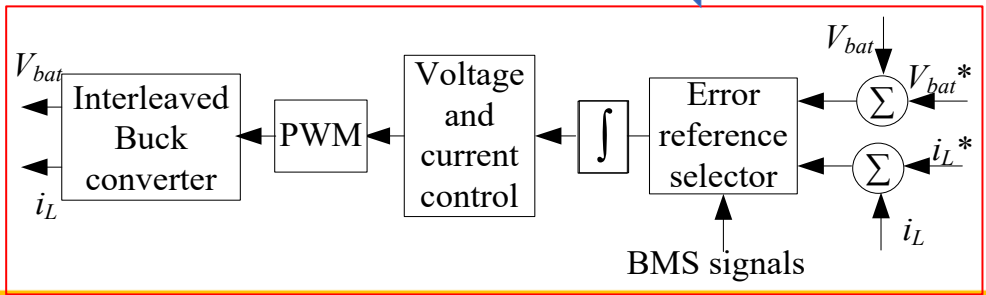
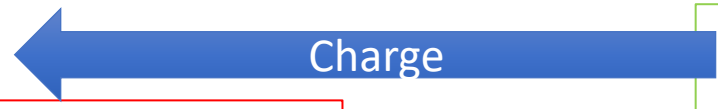
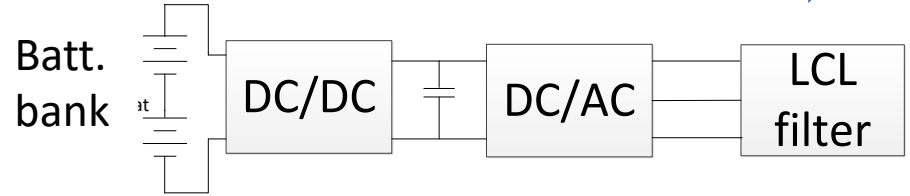
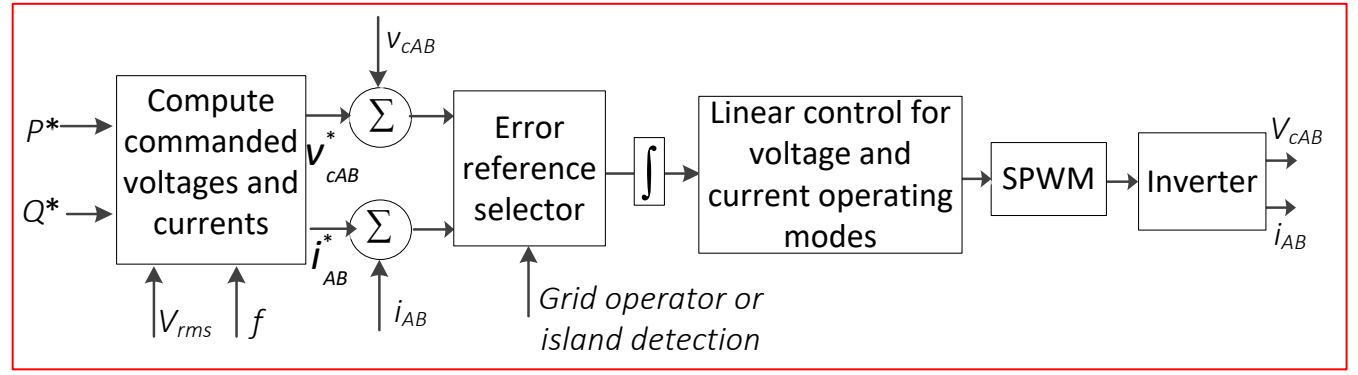
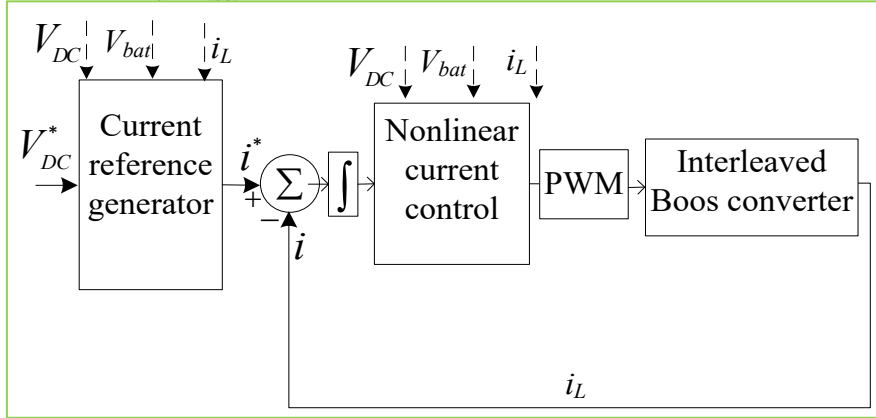
### Three-phase PWM LCL-filter rectifier

- No linear model
- Current control mode
- Input-output feedback linearization
- Integrator to withstand uncertainties





# Retos de diseño y control



# Retos de diseño y control

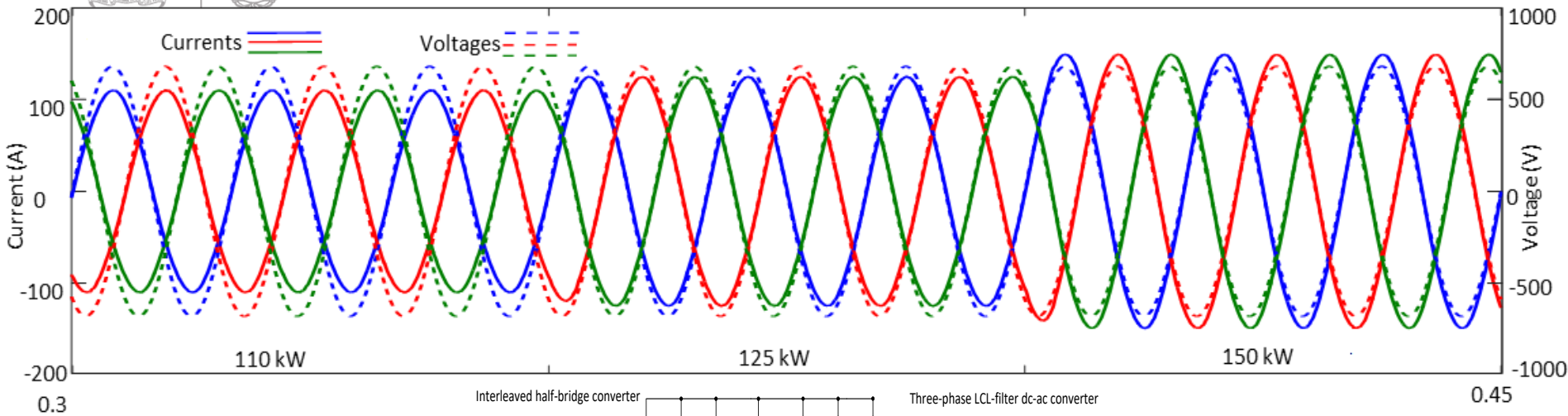


Fig.. Currents ( $i_{AB}$ ,  $i_{BC}$ ,  $i_{CA}$ ) and voltages ( $v_{AB}$ ,  $v_{BC}$ ,  $v_{CA}$ ) for 10% of tolerance in passive devices and an increase in parasitic resistances of 100%.

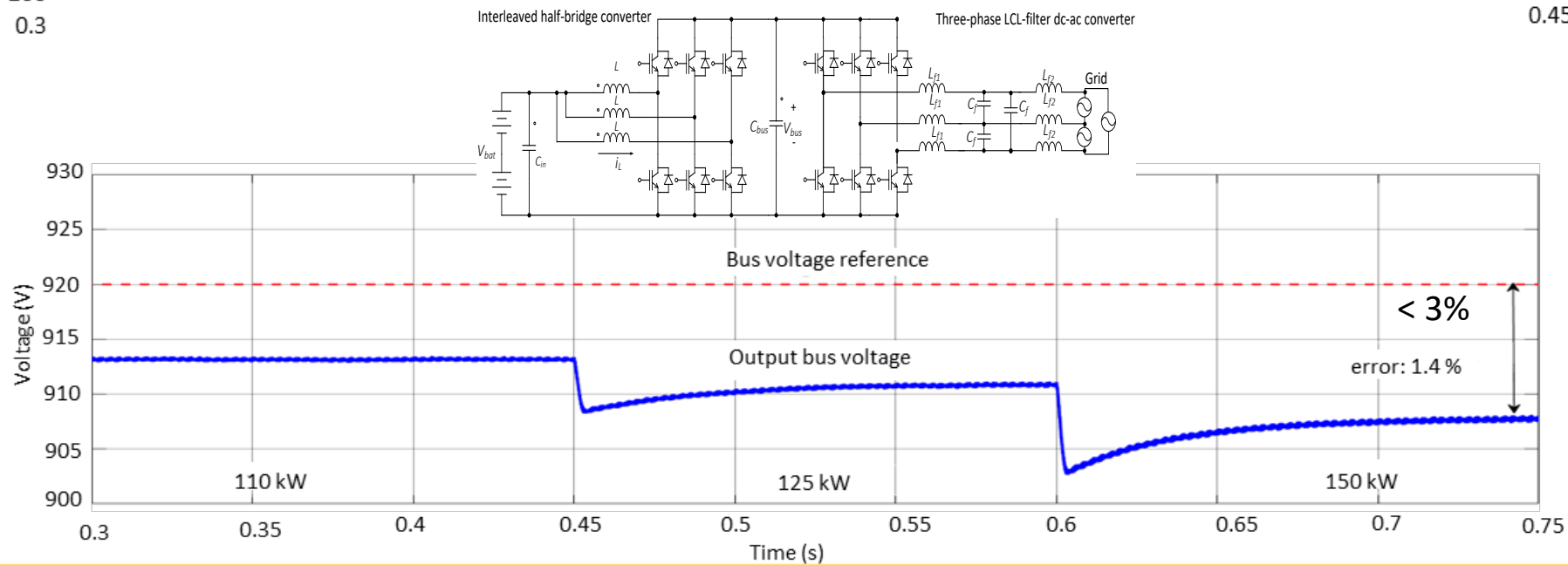


Fig. Output voltage  $V_{DC}$  with -10% of tolerance value in passive devices and an increase of 100% in resistance in passive and active devices.

# Retos de diseño y control

## Modo rectificador

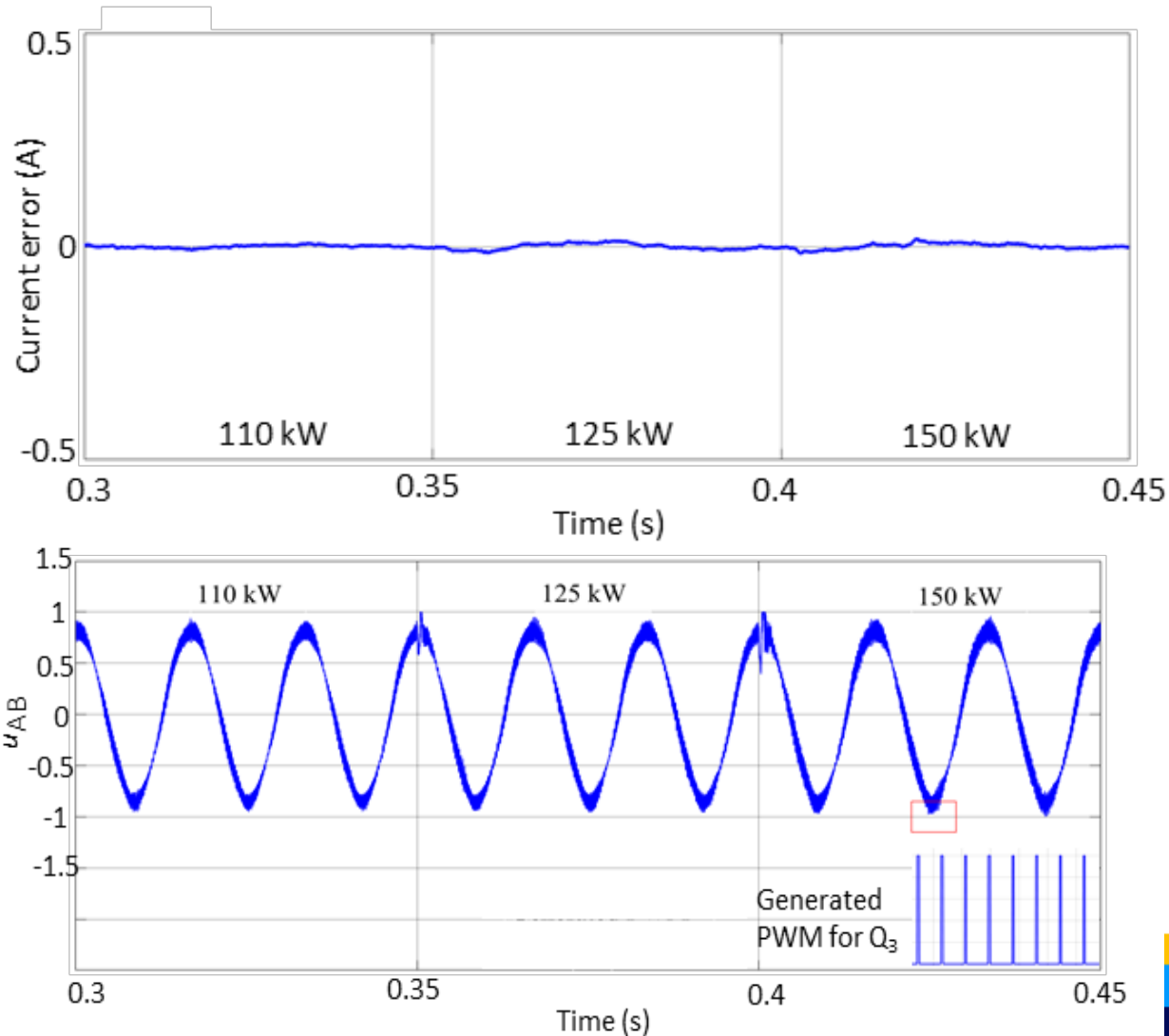


Fig. 14. Current error ( $x_1 - r_{AB}$ ).

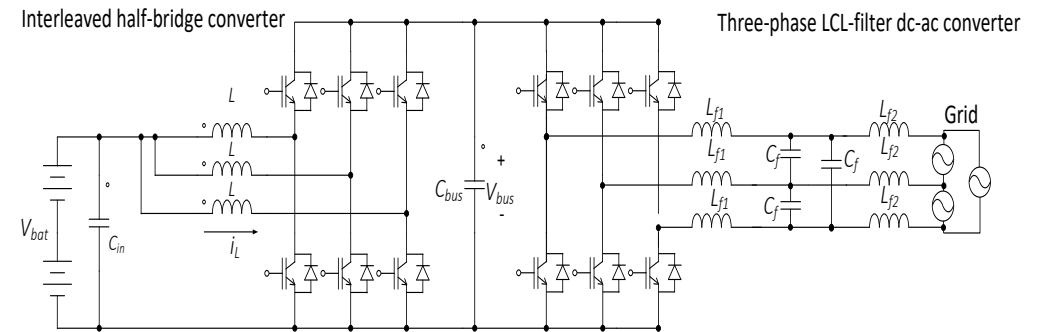
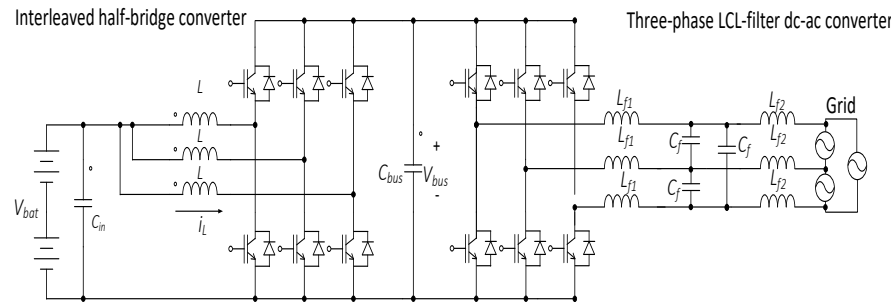
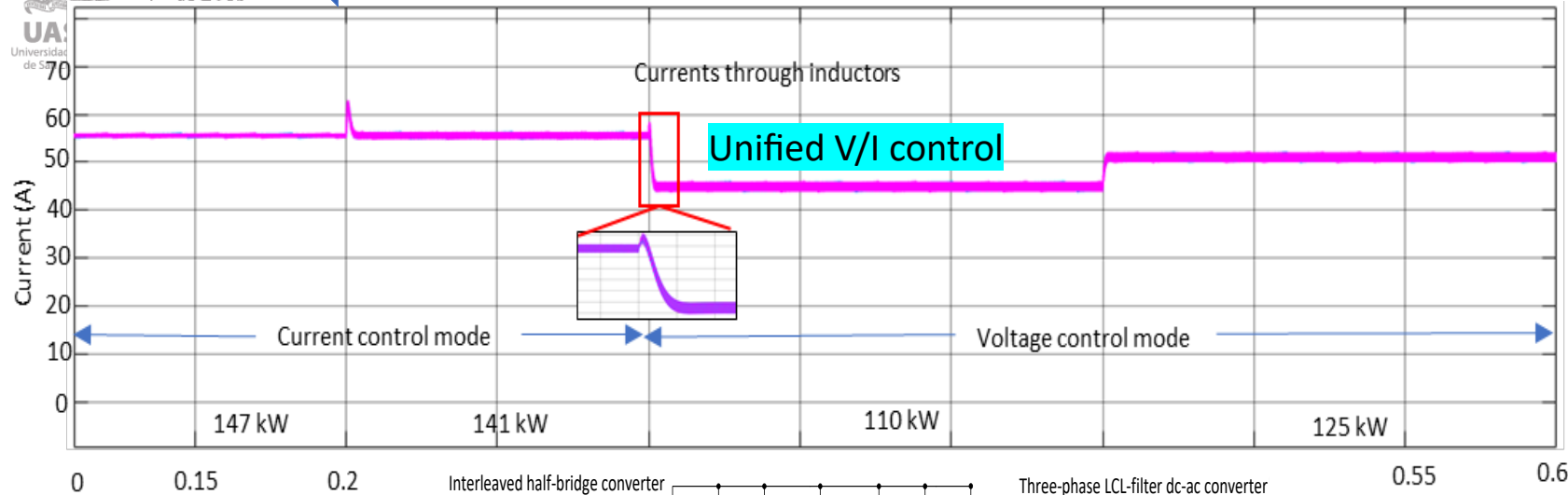


Fig. 15. Control signal  $u_{AB}$  and a portion of the generated PWM.

# Retos de diseño y control

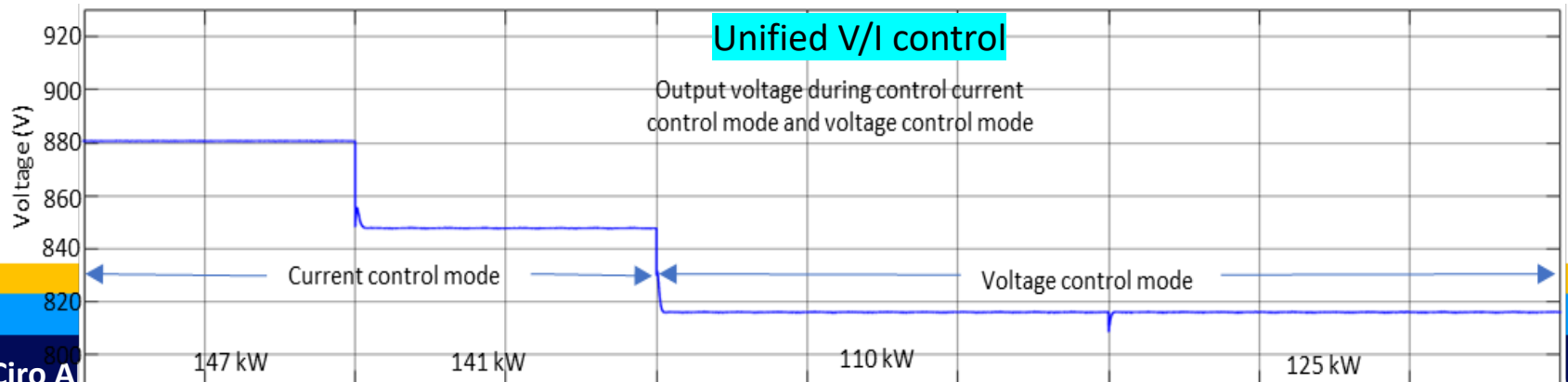
← Charge



## Interleaved half-bridge converter

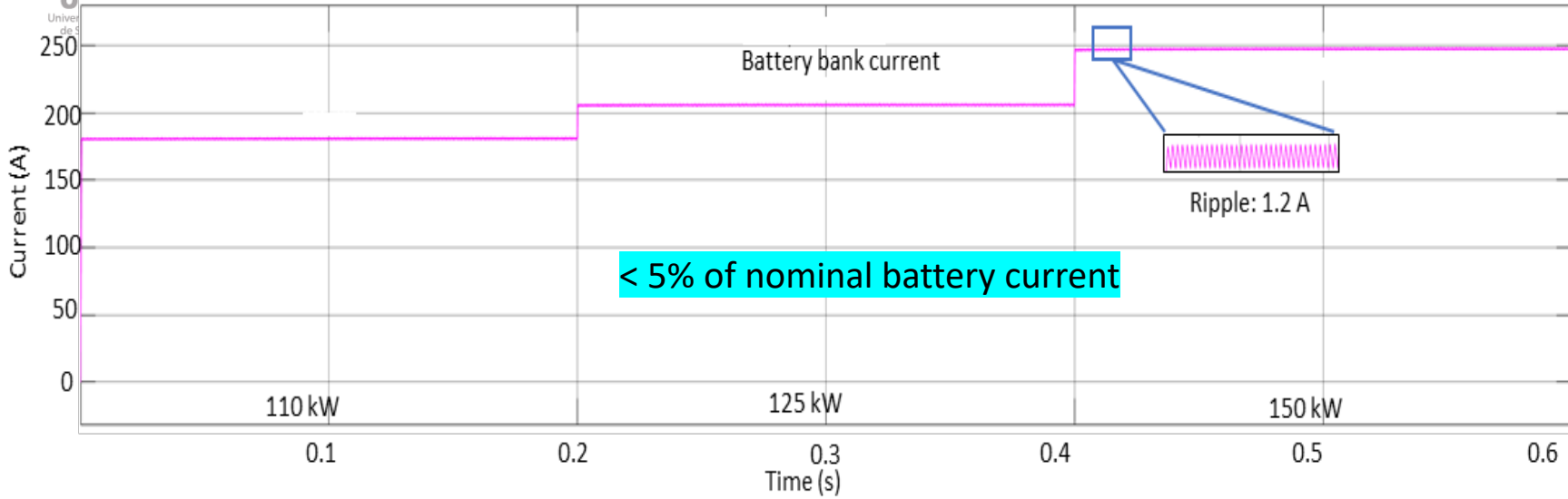
Fig. 20. Current through inductors closed-loop signal: the transition from the current control mode and the voltage control mode.

Fig. 21. Closed-loop signal: the transition from the current control mode and the voltage control mode.



# Retos de diseño y control

Discharge



Interleaved half-bridge converter

Fig. 22. Closed-loop signal of the battery bank current.

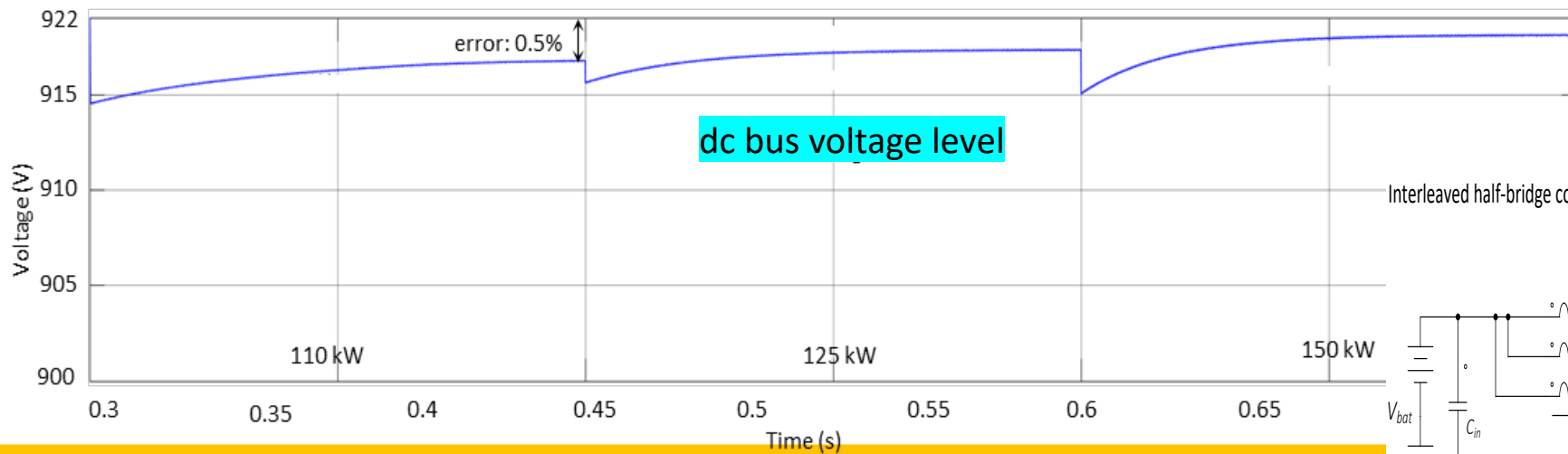
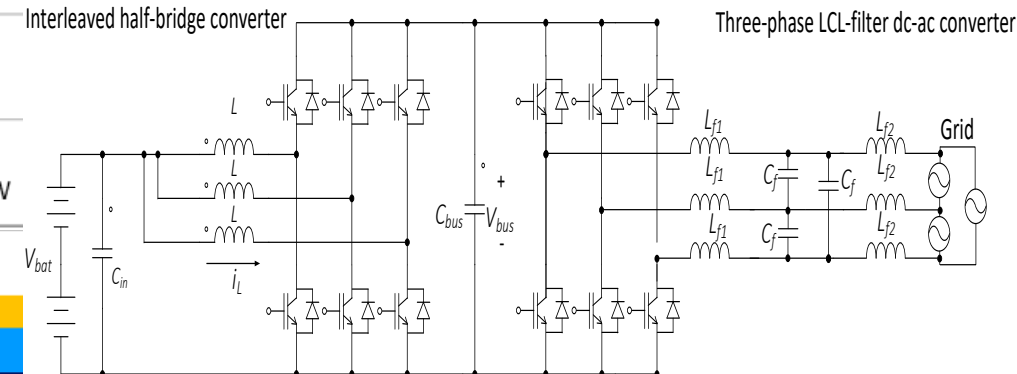
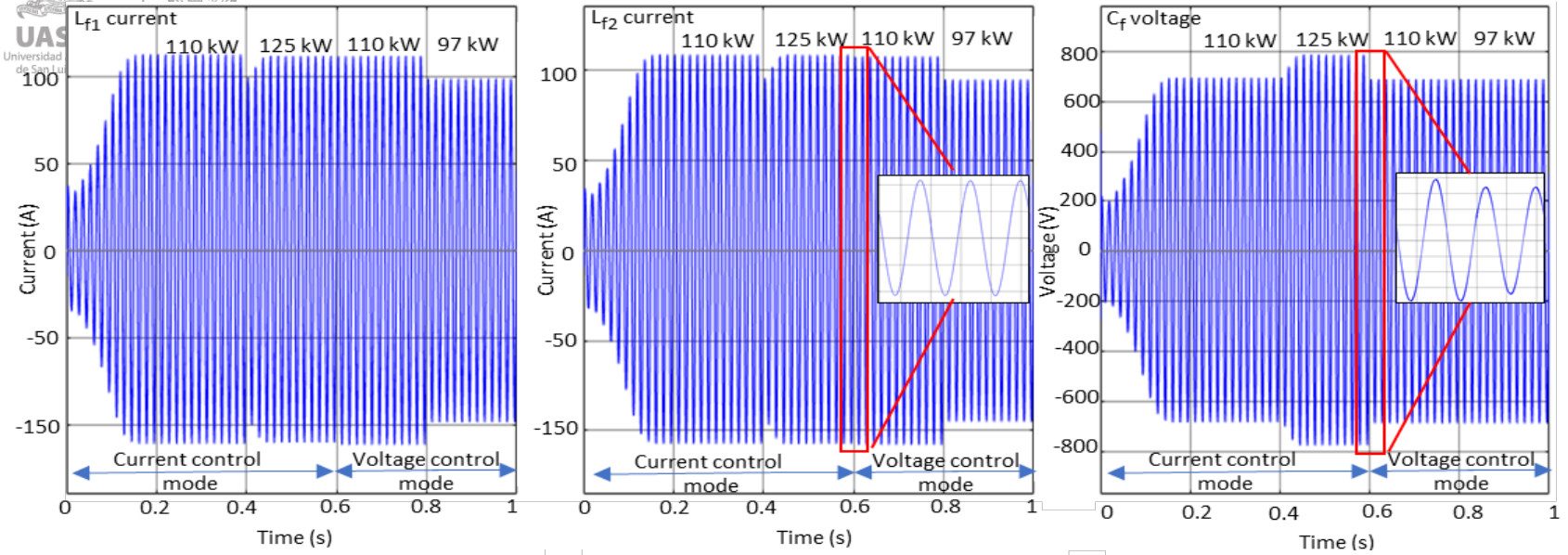


Fig. 23. Closed-loop signal of the dc bus voltage.

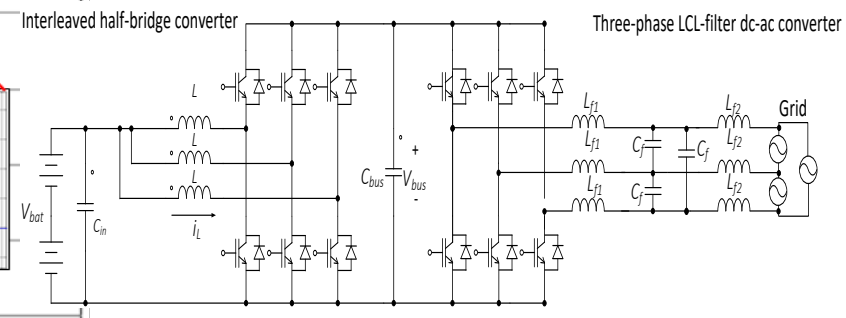
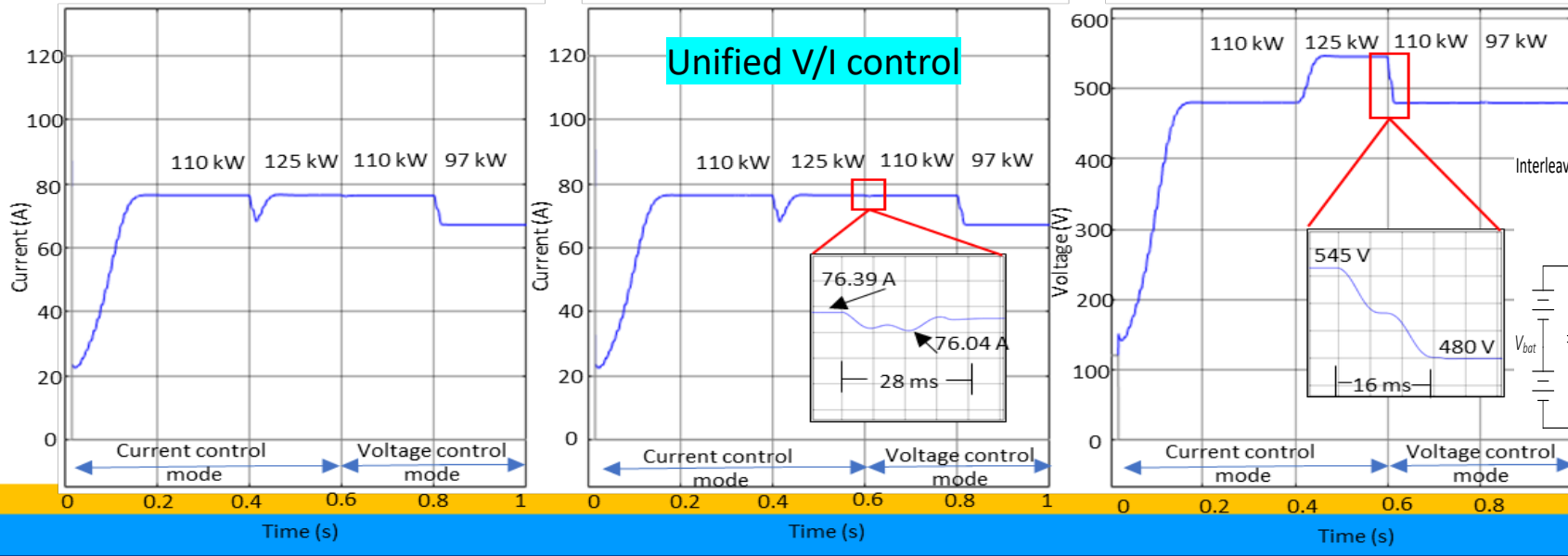


# Retos de diseño y control



## Inverter

**Fig. 26. Closed-loop instantaneous and RMS signals: switch from the ccm to the vcm: currents of  $L_{f1}$  and  $L_{f2}$ , and the output voltage  $C_f$ .**



# Retos de diseño y control



- Prototipos de electrónica de potencia
- Hardware in the loop
- OPAL
- RTDS



# Conclusiones

- **Tecnología emergente**
- **Totalmente compatible con renovables**
- **“Synchroverter”, inercia virtual**
- **17 aplicaciones en 5 categorías**
- **Falta estandarizar**
- **Múltiples áreas de desarrollo**
- **Retos para diseñadores de EP e ingenieros de control**