



# **SAIS MODULARES ¿SON REALMENTE MÁS FIABLES?**

Por Ramon Ciurans,  
*R&D UPS Project Leader en SALICRU*

## Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAI)

Los SAI han estado concebidos desde sus inicios para inmunizar las cargas críticas de las perturbaciones habituales de las redes comerciales: Variaciones de tensión ("overvoltage, undervoltage, surges"), variaciones de frecuencia lentras o transitorias, cortes y microcortes ("blackouts"), huecos de tensión ("sags"), impulsos transitorios ("spikes"), armónicos, ruido de alta frecuencia superpuesto y oscilaciones de tensión ("flicker"), entre otras.

La norma de producto que afecta a los SAI (EN62040) define los distintos tipos de SAI, entre los cuales destaca el tipo VFI ("on-line", doble conversión) que se caracteriza por la generación de una forma de onda de salida para la carga, con tensión y frecuencia independientes de la red primaria. Desde el punto de vista cualitativo este tipo de SAI es el de mejores prestaciones ya que aísla la carga de todo tipo de perturbaciones de red puesto que genera una nueva forma de onda convirtiendo primero la tensión de la fuente primaria en una tensión continua y regenerando de nuevo una forma de onda totalmente libre de perturbaciones para las cargas críticas. Sin embargo esta topología, siendo la de mayor calidad, es la topología menos eficiente puesto que la energía fluye a través de dos convertidores en serie de la plena potencia con pérdida de energía acumulada en ambos convertidores.

### Evolución de los SAI tipo "VFI"

Dado que el rendimiento ha sido el principal punto débil de este tipo de SAI, los fabricantes han ido evolucionando la arquitectura de los convertidores para mejorar eficiencia y prestaciones al mismo tiempo. Así se ha pasado de los rectificadores de 6 y 12 pulsos a tiristores iniciales a los rectificadores activos PWM y de los inversores ferro resonantes o PWM con transformador de baja frecuencia a los actuales inversores multinivel trifásicos sin transformador. Así se ha podido pasar de rendimientos en torno al 88% al 96%-97% actual. Aun no habiendo llegado al techo de rendimiento, por los estudios realizados hasta ahora parece improbable una mejora sustancial del rendimiento a nivel topológico aunque evidentemente podría haber mejoras con el uso de nuevos materiales semiconductores como los dispositivos de Carburo de Silicio (SiC) o Nitruro de Galio (GaN) o de nuevos materiales magnéticos, aunque de momento, el coste de estos dispositivos es aún muy elevado.

### SAIs en paralelo N+1 garantía de suministro para aplicaciones críticas

Una vez conseguido el máximo rendimiento posible hasta la fecha (96%-97% con tecnologías de conmutación de multinivel) y a la espera de la incorporación de nuevos dispositivos que mejoren algo esta cifra, se puede incrementar en gran medida la disponibilidad del sistema ( $A=MTBF/(MTTR+MTBF)$ ) haciendo uso del paralelismo de máquinas SAI "N+1", de forma que "N" es el número de SAI necesarios para suministrar la energía a toda la carga y "1" es un SAI que se utilizará como reserva redundante. De esta forma se pueden conseguir disponibilidades de 5 nueves ( $A \geq 0,99999\%$ ) que equivale a 5 minutos de no disponibilidad en 1 año o 6 nueves ( $A \geq 0,999999\%$ ) que equivale a 30 segundos de no disponibilidad en un año que al fin y al cabo mejoran la fiabilidad del Data Center (DC) y el TCO de la propiedad con respecto al consumo energético del Data Center.

Así mismo con la tecnología paralelo se puede llegar a obtener una alta calificación Tier (Tier III o Tier IV), clasificación publicada por el Instituto Uptime y titulada "Data Center Site Infrastructure Tier Standard: Topology.", según la cual los equipos que acreditan ambos niveles Tier III o Tier IV, son los que garantizan mejores niveles de fiabilidad y disponibilidad, no solamente por la estricta especificación de los SAI empleados sino por el diseño completo del entorno del DC, del sistema de refrigeración y de la distribución eléctrica hacia las cargas críticas.

## Concepto de Modularidad de un SAI

---

El concepto de modularidad de un SAI es difícil de circunscribir en un formato concreto. Podríamos decir que la modularidad en SAIs se puede expresar de muchas formas:

### · Modularidad en potencia

Consiste en un SAI cuya arquitectura responde a un esquema en el que hay algunas partes comunes y otras partes (módulos de potencia) que se van repitiendo desde un único módulo hasta un total de módulos suficiente para cubrir la potencia que requiera la aplicación.

Las partes comunes serán normalmente todas aquellas que no manejan potencia como por ejemplo electrónica de control y gestión del funcionamiento del SAI, hardware de interface de comunicaciones con el mundo exterior (comunicaciones serie, paralelo, CAN, USB, TCP-IP, interface a relés o entradas-salidas digitales, etc.), banco de baterías común (con o sin cargador de baterías), filtros EMI de entrada/salida, bornes de entrada/salida/baterías, o la envolvente o contenedor (armario o caja en función de la potencia máxima) para ubicar un número máximo de módulos.

Las partes no comunes serán los distintos módulos de potencia que permitirán configurar un equipo de la potencia y redundancia deseadas. Los distintos módulos de una determinada potencia se conectaran en paralelo para que la potencia total del equipo sea la suma de las potencias de todos los módulos conectados en paralelo.

Como se puede observar en esta estructura hay elementos no redundantes que comportan un fallo del sistema en caso de fallo de unos de estos elementos. Sin embargo los módulos de potencia son elementos redundantes de forma que si falla un módulo de potencia el sistema podrá seguir funcionando con el resto de módulos que podrán suministrar menos potencia que la inicial. Con el debido sobre dimensionamiento y en función de éste, el sistema podrá llegar a ser tolerante al fallo de uno o más módulo de potencia.

### · Modularidad funcional de potencia

Esta es una estructura similar a la anterior en el sentido que continua habiendo unas partes comunes y otras no comunes. Centrándonos en éstas últimas, el bloque de potencia de un SAI tipo "VFI" de doble conversión suele constar de una serie de convertidores de potencia que enumeramos a continuación:

- Rectificador-PFC
- Ondulador
- Cargador de Baterías
- Módulo Interruptor Estático

En la "Modularidad en Potencia" descrita en el anterior apartado, dichos convertidores de potencia todos juntos eran considerados como un módulo de potencia. También podemos entender otro tipo de modularidad a base de considerar cada convertidor como un módulo paralelizable en sí mismo, con lo que dispondremos de un sistema aún más flexible que el anterior dado que podremos dimensionar independientemente la potencia y redundancia de cada convertidor. Así por ejemplo podríamos dimensionar un SAI con más convertidores rectificadores y cargadores si quisiésemos sobredimensionar la carga de baterías, o con más Inversores si quisiésemos más potencia transitoria a la salida.

## - Modularidad total

Es la que se basa en considerar cada módulo como un SAI completo de forma que las únicas partes comunes son el el armario o caja, las conexiones aguas arriba de la entrada del SAI y aguas abajo de la salida del SAI, las conexiones de las baterías, la interfaz de comunicación con el mundo exterior y el sistema de Monitorización.

Aun así existen dos variantes de estos sistemas con sus ventajas e inconvenientes:

**Sistema modular con Bypass Estático Distribuido:** Cada módulo incorpora su propio sistema de Interruptor Estático para conmutar su salida de Inversor a Red. Al ser un sistema distribuido debe haber una perfecta sincronización entre módulos para garantizar que todos los módulos conmutaran en el mismo instante de tiempo.

**Sistema modular con Bypass Estático Centralizado:** En este caso el sistema de transferencia estático de Inversor a Red es único y por lo tanto es uno de los elementos comunes del SAI.

Existe un debate hoy en día acerca de cuál de estas dos opciones ofrece mejor fiabilidad y disponibilidad. Los sistemas con Bypass distribuido gozan de la ventaja de que el Bypass es redundante y por lo tanto dejará de ser un punto crítico. Además los criterios de dimensionamiento de la Potencia i Corriente máximas del Bypass suelen ser mucho más generosos que los de dimensionamiento de los inversores, cosa que beneficia la disponibilidad en caso de fallo de uno de los módulos Bypass. Como inconveniente podríamos decir que así como la Potencia del Bypass es distribuida, también el control es distribuido, y este hecho dificulta la toma de decisiones acerca del instante en el que tendremos que realizar la conmutación de Inversor a Bypass o de Bypass a Inversor. La decisión deberá ser síncrona para todos los módulos conectados en paralelo y esto dificulta la gestión del Bypass distribuido.

En los sistemas con Bypass centralizado, evidentemente la maniobra de conmutación de Inversor a Bypass o de Bypass a Inversor es mucho más sencilla debido a la existencia de un único módulo de Potencia de Bypass, aunque éste hecho convierte a dicho módulo en un punto crítico no redundante.

Una tercera solución de compromiso entre ambos sistemas es un Bypass centralizado con redundancia 1+1. Hay algún fabricante que ha introducido esta tercera vía aunque podrían atribuírsele las ventajas e inconvenientes de las dos opciones anteriores.

## SAIs modulares (modularidad total)

Los SAI modulares descritos anteriormente suelen presentarse dispuestos en forma de rack (horizontal) dentro de un armario con una capacidad máxima de potencia determinada. La estructura modular de los SAI dará una serie de ventajas especialmente importantes en aplicaciones para Data Centers:

- 1) Huella pequeña: poca ocupación del SAI en superficie
- 2) Alta Fiabilidad: al ser posible configurar-lo con N+m unidades, escogiendo para cada Data Center (u otra aplicación), dependiendo de su criticidad, el nivel de redundancia que se desea.
- 3) Alta Disponibilidad: a igualdad de fiabilidad de un módulo con respecto de una unidad SAI convencional, se podrán conseguir Disponibilidades (A) de 5 o 6 nueves, solamente con la adecuada selección del nivel de redundancia.

- 4) Eficiencia del Sistema, se puede optimizar por dos vías:
- a. Mejora de Rendimiento energético del módulo. El diseño de un único módulo (o de un número reducido de tipos de módulos) facilita la optimización de los convertidores de potencia para conseguir el máximo rendimiento, seleccionando tanto la topología más eficiente como los componentes con menos pérdidas energéticas para cada módulo.
  - b. Gestión Inteligente del sistema modular: Teniendo en cuenta que un módulo alcanza el máximo rendimiento energético en torno al 75% de la carga y teniendo en cuenta la topología redundante del sistema y la variabilidad temporal de la carga, se pueden aplicar criterios para gestionar el sistema completo de forma que trabajen solamente aquellos módulos necesarios según la carga conectada en cada momento y que funcionen con el nivel de potencia con la que se optimiza el rendimiento del módulo. Además se pueden aplicar criterios de ciclado para igualar el tiempo de funcionamiento de todos los módulos del sistema y optimizar así la fiabilidad de los mismos y del sistema completo o criterios de módulos en "stand-by" que están funcionalmente apagados y en reserva, a la espera de que se les requiera para reforzar la disponibilidad del sistema.
- 5) Escalable: La posibilidad de adaptar la potencia del sistema en función de la futura evolución y crecimiento del Data Center es, sin lugar a dudas, una de las mayores ventajas que aporta la modularidad, respecto de soluciones de potencia fija.
- 6) Adaptabilidad a la potencia: Evidentemente la solución modular, será distinta en función de la potencia. La diferencia básica en la configuración del sistema modular será la potencia de cada módulo. Así podemos hablar de sistemas basados en módulos de 30-40kVA para SAIs de potencia mediana o módulos de 50-100-200kVA para grandes SAIs.
- 7) Adaptación a los niveles Tier en centros de Datos (DC). La solución modular puede dar lugar a diseños perfectamente adaptados a los niveles más exigentes de clasificación Tier, definidos por el Uptime Institute.
- 8) Mejora del TCO (Coste Total de Propiedad). Esto se conseguirá a base de mejorar el Opex (Gastos Operacionales) gracias a que con sistemas modulares se consigue el máximo rendimiento energético del módulo y del sistema global con una adecuada gestión del mismo. Otro aspecto importante es la reducción del CAPEX (Gastos de Capital) debido fundamentalmente a que la fabricación de gran cantidad de módulos idénticos permite el desarrollo de una economía de escala que mejora los costes de fabricación de los SAI.

## Fiabilidad (MTBF) y Disponibilidad(A) de los distintos tipos de SAI

---

El objetivo principal en la implementación de un sistema SAI es la mejora de la confiabilidad de la energía dentro de los límites de la tecnología actual. El objetivo último es aislarse de cualquier perturbación de la fuente principal de energía (Red Comercial).

Los primeros SAI (años 60) estaban compuestos por un rectificador, batería e inversor y se pensaron para estabilizar la potencia de salida y seguir apoyando la carga, sin interrupción, en el caso de fallo de suministro de la red principal. La fiabilidad de esta cadena SAI sencilla dependía de la fiabilidad de dos de los tres elementos críticos que estaban en serie: inversor y bus de continua proveniente de las baterías. Un fallo en cualquiera de ellos significaba una caída de carga inmediata.

A principios de los años 70 se introdujo el interruptor de Bypass Estático para permitir una transferencia de carga sin interrupciones a la red eléctrica de reserva en caso de un fallo del inversor o una sobrecarga. Esta alimentación de reserva, aunque mucho menos fiable que los SAI, sirve como fuente de alimentación de emergencia en el caso de un fallo del inversor o bus de continua (baterías), lo que permite la continuidad de la alimentación a la carga mientras se subsana la avería.

Esta nueva arquitectura mejora sustancialmente la fiabilidad general, que ya no dependía principalmente de la fiabilidad de la cadena Inversor+Bus DC. La disponibilidad de los nuevos SAI con Bypass Estático dependía de la calidad de la red eléctrica (MTBF\_RED), el tiempo de reparación del SAI (MTTR\_SAI) y de la fiabilidad del Interruptor Estático (MTBF\_BYP).

Sin embargo, en los últimos años el auge del almacenamiento en la “nube” y la necesidad de mantener gran cantidad de datos salvaguardados en grandes infraestructuras de servidores (Data Centers), ha hecho que se requieran niveles muchísimo más altos de fiabilidad en los sistemas de seguridad entre los que se encuentran los SAI. Cargas muy críticas no pueden confiar en una configuración de alimentación de un solo SAI con Bypass Estático. La necesidad de SAI con configuraciones paralelo redundantes (n + 1) se está convirtiendo en imprescindible. El principal argumento para la elección de un tipo de SAI determinado deberá ser salvaguardar de la mejor manera posible la integridad de tal cantidad de información global. Así pues es necesario un estudio comparativo de Fiabilidad (MTBF)/Disponibilidad (A) entre los distintos tipos de SAI para tomar la decisión correcta. Una comparación de la fiabilidad para varias configuraciones de SAI se debe basar en cifras de fiabilidad de acuerdo con la norma MIL-HDBK-217 F (Not.2, 1995).

La tasa de Fallos de un convertidor se define como:

$$\lambda_{[conv]} = 1 / \text{MTBF}[conv]$$

La Disponibilidad (A) se define como:

$$A = \frac{\text{MTBF}[\text{SAI}]}{\text{MTBF}[\text{SAI}] + \text{MTTR}[\text{SAI}]}$$

#### · SAI individual sin interruptor de bypass estático (BYP)

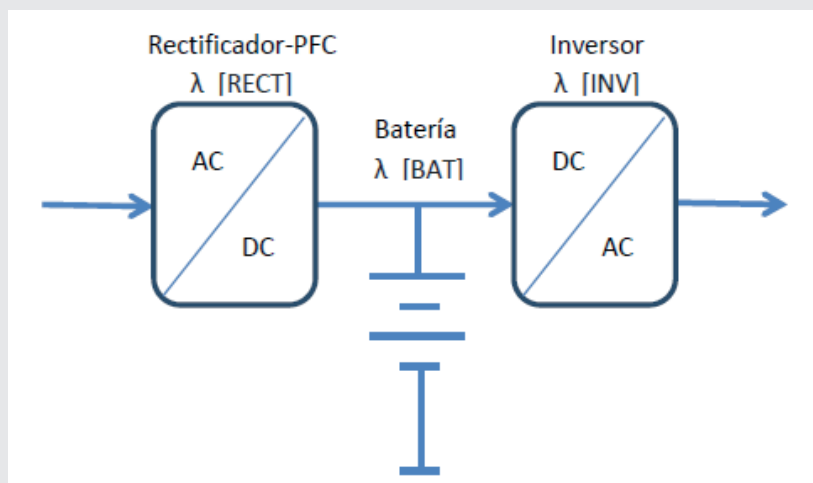


Fig 1. Esquema de bloques eléctrico (con tasa de fallos) de un SAI sin Bypass

La fiabilidad de un solo SAI sin bypass depende de la fiabilidad del rectificador, batería e inversor (véase la Figura 1). En este sistema en caso de fallo de inversor o del Bus de Continua (Baterías) o del rectificador durante un tiempo prolongado (superior a la autonomía del sistema), habría un cero a la salida.

### Cálculo del MTBF (MTBF\_[SAI])

Siendo:

MTBF\_[SAI]: el tiempo medio entre fallos de unidad sin bypass estático

$\lambda_{[SAI]}$ : la tasa de fallo de una sola unidad sin interruptor de bypass estático

$\lambda_{[RECT]}$ : la tasa de fallo del rectificador

$\lambda_{[BAT]}$ : la tasa de fallo del bus DC, incluida la conexión con la batería

$\lambda_{[INV]}$ : la tasa de fallo del inversor

$$MTBF_{[SAI]} = 1 / \lambda_{[SAI]}$$

$$\lambda_{[SAI]} = \lambda_{[RECT]} + \lambda_{[BAT]} + \lambda_{[INV]}$$

Suponiendo las siguientes cifras orientativas:

$$\lambda_{[RECT]} = 20 \text{ por millón de horas}$$

$$\lambda_{[BAT]} = 10 \text{ por millón de horas}$$

$$\lambda_{[INV]} = 20 \text{ por millón de horas}$$

El MTBF\_[SAI] para un sistema SAI sin interruptor de bypass estático sería de unas 20.000 horas.

### · SAI individuales con interruptor de bypass estático

La fiabilidad de un solo SAI puede aumentarse de forma significativa por la introducción de una red de alimentación eléctrica redundante y su conexión con la fuente de alimentación SAI principal por medio de un interruptor de transferencia de Bypass Estático (Figura 2). Por ejemplo, en el caso de un fallo del inversor la carga no se bloqueará sino que será transferida del inversor a la red eléctrica sin interrupción.

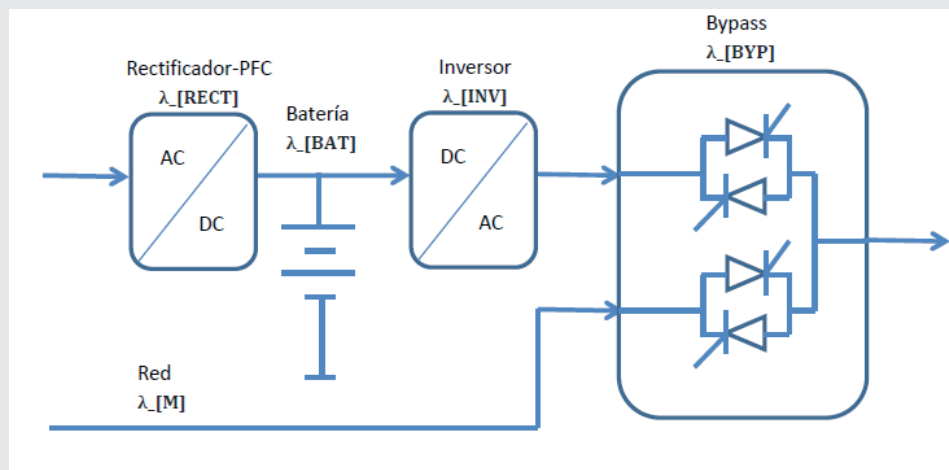


Fig2. Esquema de bloques eléctrico (con tasa de fallos) de un SAI con Bypass

### Cálculo del MTBF (MTBF\_[SAI + BYP])

Siendo:

MTBF\_[SAI + BYP]: el tiempo medio entre fallos del SAI con interruptor de bypass estático

MTBF\_[M]: el tiempo medio entre fallos de la red eléctrica

$\lambda$ \_[SAI]: la tasa de fallo de una sola unidad sin interruptor de bypass estático

$\lambda$ \_[SAI + BYP]: la tasa de fallo de un solo SAI con interruptor de bypass estático

$\lambda$ \_[M]: la tasa de fallos de la red eléctrica

$\lambda$ \_[SAI]/ $\lambda$ \_[M]: la tasa de fallo de una sola unidad sin interruptor de bypass estático en paralelo con la tasa de fallos de la red eléctrica

$\lambda$ \_[BYP] : tasa de fallos del interruptor de Bypass Estático, Potencia o Control

MTTR\_[BYP]: el tiempo medio de reparación del interruptor de bypass estático

MTTR\_[M]: el tiempo medio de reparación de la red

MTTR\_[SAI]: el tiempo medio de reparación de un solo SAI con interruptor de bypass estático

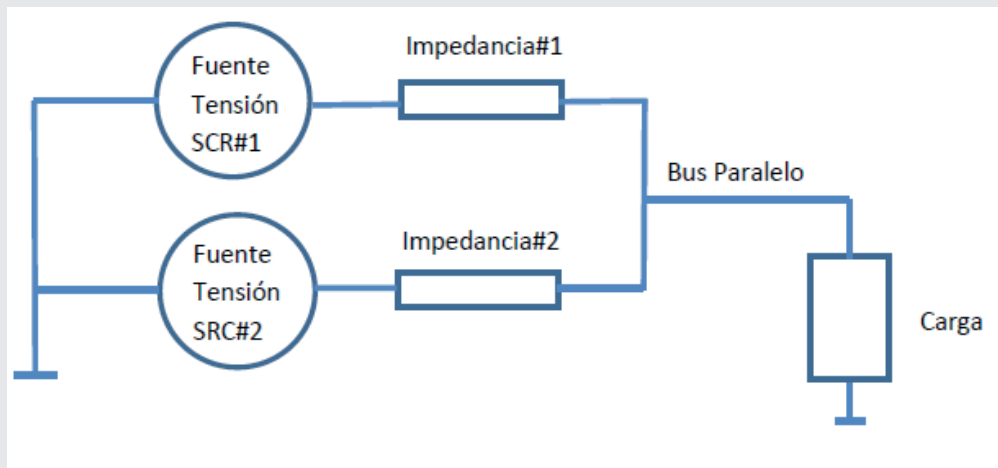


Fig 3. Fuentes de tensión en paralelo



En la figura 3 se puede observar como en un sistema en el que hay dos fuentes de tensión conectadas en paralelo (SCR#1 y SCR#2) el cálculo de la tasa de fallo del sistema paralelo será:

$$\begin{aligned}\lambda_{[\text{paralelo}]} &= \lambda_{[\text{SRC}\#1]} // \lambda_{[\text{SRC}\#2]} = \\ &= \lambda_{[\text{SRC}\#1]} \times \lambda_{[\text{SRC}\#2]} \times (\text{MTTR}_{[\text{SRC}\#1]} + \text{MTTR}_{[\text{SRC}\#2]})\end{aligned}\quad (1)$$

Aplicando la expresión (1) en caso del SAI con Bypass estático:

$$\begin{aligned}\lambda_{[\text{SAI+BYP}]} &= \lambda_{[\text{SAI}]} // \lambda_{[\text{M}]} + \lambda_{[\text{BYP}]} = \\ &= (\lambda_{\text{SAI}} \times \lambda_{\text{M}} \times (\text{MTTR}_{[\text{SAI}]} + \text{MTTR}_{[\text{M}]}) + \lambda_{\text{BYP}}\end{aligned}\quad (2)$$

$$\text{MTBF}_{[\text{SAI+BYP}]} = 1/\lambda_{[\text{SAI+BYP}]} \quad (3)$$

Con las cifras estadísticas de análisis de fallos usadas anteriormente:

$$\lambda_{[\text{RECT}]} = 20 \text{ por millón de horas}$$

$$\lambda_{[\text{BATT}]} = 10 \text{ por millón de horas}$$

$$\lambda_{[\text{INV}]} = 20 \text{ por millón de horas}$$

Se puede obtener:

$$\text{MTBF}_{[\text{SAI}]} = 20.000 \text{ horas}$$

Además podemos añadir otros datos estadísticos a modo de ejemplo:

$$\lambda_{[\text{BYP}]} = 2/1.000.000 = 0,000002 \text{ horas}$$

$$\text{MTBF}_{[\text{M}]} = 50 \text{ horas (esta cifra representa una red de "buena calidad")}$$

$$\text{MTTR}_{[\text{SAI}]} = 6 \text{ horas (MTTR de un SAI "Stand Alone", no modular)}$$

$$\text{MTTR}_{[\text{M}]} = 0,1 \text{ horas.}$$

Utilizando estos datos en la expresión (2):

$$\begin{aligned}\lambda_{[\text{SAI} + \text{BYP}]} &= ((1/20.000) \times (1/50) \times (6 + 0,1)) + (2/1.000.000) = \\ &= (0,00005 \times 0,02 \times 6,1) + 0,000002 = 0,0000081\end{aligned}$$

$$\text{MTBF}_{[\text{SAI} + \text{BYP}]} = 1/(\lambda_{[\text{SAI} + \text{BYP}]}) = 1/0,0000081 = 123.456 \text{ h}$$

Teniendo en cuenta las expresiones (2) y (3) se puede observar que la fiabilidad de un SAI con interruptor de bypass estático ( $\text{MTBF}_{[\text{SAI} + \text{BYP}]}$ ) depende los siguientes parámetros: las fiabilidades de SAI y red ( $\lambda_{\text{SAI}}$ ,  $\lambda_{\text{M}}$ ), el MTTR del SAI y red y de la fiabilidad del interruptor de bypass estático ( $\lambda_{\text{BYP}}$ ).

## · SAI redundantes en paralelo con interruptor de bypass estático

La fiabilidad de un solo SAI puede incrementarse significativamente mediante la introducción de una configuración en paralelo redundante (Figura 4).

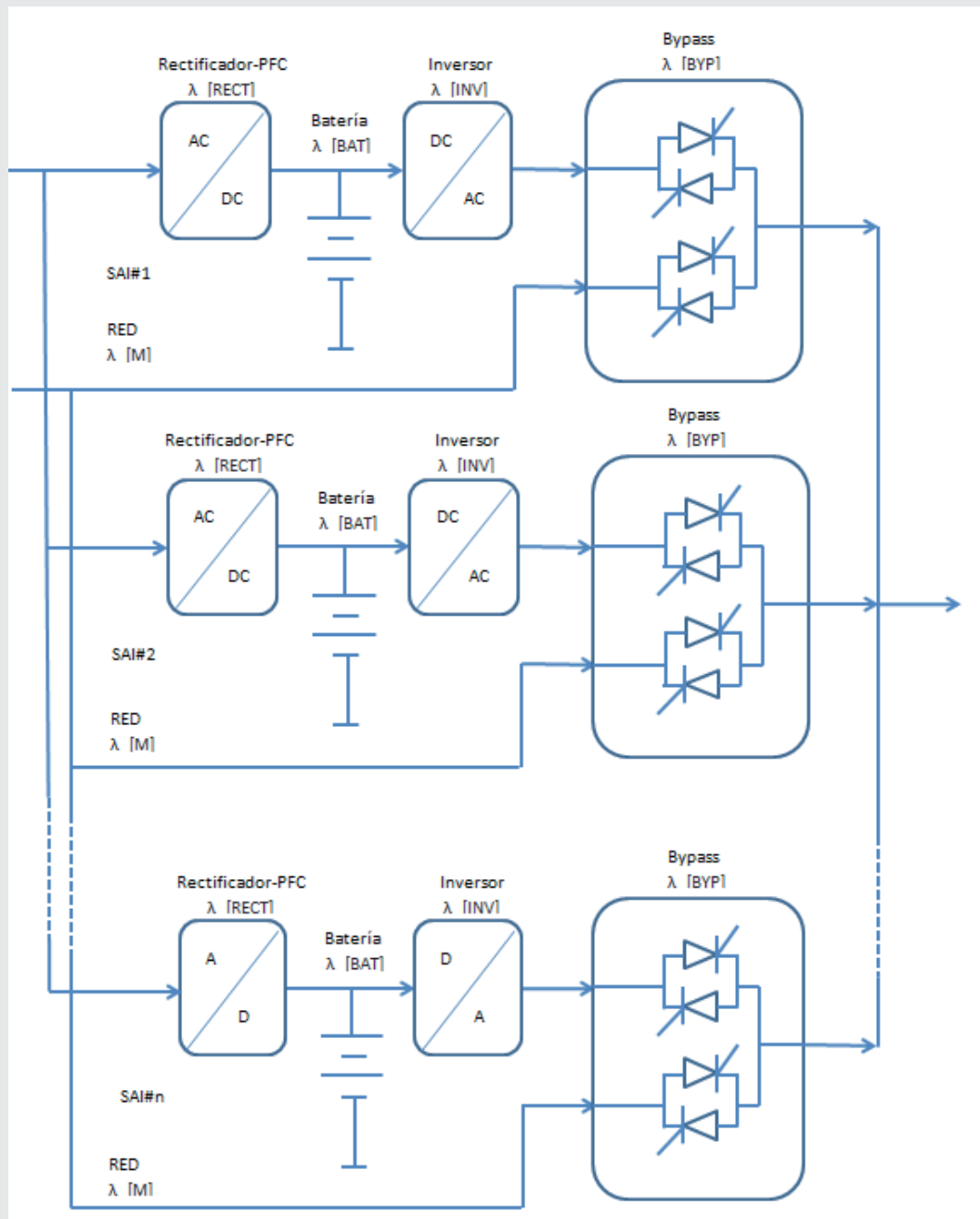


Fig 4. Esquema de bloques eléctrico (con tasa de fallos) de un Sistema N+1

Cálculo del MTBF para un sistema SAI paralelo redundante (n+1) (MTBF<sub>[(n+1)SAI+BYP]</sub>)

Tasa de Fallo:

$$\begin{aligned} \lambda_{[(n+1)SAI+BYP]} &= (\lambda_{[SAI1]}/\lambda_{[SAI2]} \dots \dots \dots / \lambda_{[SAI(n+1)]}) + \\ &+ (n+1) \times \lambda_{[PBUS]} \\ &+ (\lambda_{[BYP1]}/\lambda_{[BYP2]} \dots \dots \dots / \lambda_{[BYP(n+1)]}) \\ &\simeq (n+1) \times \lambda_{[PBUS]} \end{aligned}$$

Fiabilidad:

$$MTBF_{[(n+1)SAI+BYP]} = 1/\lambda_{[(n+1)SAI+BYP]}$$

Disponibilidad:

$$A_{[(n+1)SAI+BYP]} = \frac{MTBF_{[(n+1)SAI+BYP]}}{MTBF_{[(n+1)SAI+BYP]} + MTTR_{[SAI]}}$$

La fiabilidad de un SAI paralelo redundante (n + 1) depende en gran medida de la tasa de fallo del bus paralelo, que es punto de fallo más crítico. Las cadenas de SAI en paralelo-redundante, los interruptores de bypass estático y su electrónica de control, así como la tensión de red son todos elementos redundantes y tienen por tanto, un impacto insignificante sobre la fiabilidad general.

Configuración	$\lambda$ (por millón de horas)	MTBF	MTTR	A
(1+1)	0,8	1.250.000	12	0,9999904 (5 nueves)
(2+1)	1,2	833.000	18	0,9999978 (5 nueves)
(3+1)	1,6	625.000	24	0,9999616 (4 nueves)
(4+1)	2	500.000	30	0,99994 (4 nueves)
(5+1)	2,4	416.666	36	0,999913 (4 nueves)

Tabla 1. Valores de MTBF, MTTR,  $\lambda$  y A para distintas configuraciones (n+1)

En la tabla anterior se han supuesto las siguientes cifras:

MTBF<sub>[M]</sub> = 50 horas, esta cifra representa una red 'buena calidad'

$\lambda_{[PBUS]}$  = 0,4 por millón de horas.

Desarrollando los cálculos para n=1, n=2 y n=3 tenemos lo siguiente:

$$\begin{aligned} \lambda_{(n+1)[SAI+BYP]} &= (\lambda_{[SAI1]}/\lambda_{[SAI2]} \dots \dots \dots / \lambda_{[SAI(n+1)]}) + \\ &+ (n+1) \times \lambda_{[PBUS]} \\ &+ (\lambda_{[BYP1]}/\lambda_{[BYP2]} \dots \dots \dots / \lambda_{[BYP(n+1)]}) \\ &\simeq (n+1) \times \lambda_{[PBUS]} \end{aligned}$$

#### Tasa de Fallos y MTBF

Porqué el término  $(\lambda_{[SAI1]}/\lambda_{[SAI2]} \dots \dots \dots / \lambda_{[SAI(n+1)]})$  suponiendo  $n=2 \rightarrow$

$$\begin{aligned} &= (\lambda_{[SAI1]} \times \lambda_{[SAI2]} \times \lambda_{[SAI3]}) \times (MTTR_{[SAI1]} + MTTR_{[SAI2]} + MTTR_{[SAI3]}) = \\ &= (1/20.000) \times (1/20.000) \times (1/20.000) \times (3 \times 6) = 0,00005 \times 0,00005 \times 0,00005 \times 18 = 2,25 \exp -12 \end{aligned}$$

Para  $n=3 \rightarrow 1,5 \exp -16$

Para  $n=4 \rightarrow 9,38 \exp -21$

Cifras muy pequeñas de tasa de fallo

Y el término  $(\lambda_{[BYP1]}/\lambda_{[BYP2]} \dots \dots \dots / \lambda_{[BYP(n+1)]})$  suponiendo  $n=2 \rightarrow$

$$\begin{aligned} &= (\lambda_{[BYP1]} \times \lambda_{[BYP2]} \times \lambda_{[BYP3]}) \times (MTTR_{[BYP1]} + MTTR_{[BYP2]} + MTTR_{[BYP3]}) = \\ &= ((2/1.000.000) \times (2/1.000.000) \times (2/1.000.000)) \times (3 \times 6) = 1,4 \exp -16 \end{aligned}$$

Cifra aún más pequeña.

Por lo tanto la fórmula se resume en  $\lambda_{(n+1)[SAI+BYP]} = (n+1) \times \lambda_{[PBUS]} = (n+1) \times 0,4/1.000000$

Para  $n=1 \rightarrow \lambda_{(1+1)[SAI+BYP]} = (1+1) \times \lambda_{[PBUS]} = (1+1) \times 0,4/1.000000 = 0,8/1.000.000$

$MTBF[SAI+BYP] = 1/ \lambda_{(1+1)[SAI+BYP]} = 1.250.000 \text{ h}$

Para  $n=2 \rightarrow \lambda_{(2+1)[SAI+BYP]} = (2+1) \times \lambda_{[PBUS]} = (2+1) \times 0,4/1.000000 = 1,2/1.000.000$

$MTBF[SAI+BYP] = 1/ \lambda_{(2+1)[SAI+BYP]} = 833.333 \text{ h}$

Para  $n=3 \rightarrow \lambda_{(3+1)[SAI+BYP]} = (3+1) \times \lambda_{[PBUS]} = (3+1) \times 0,4/1.000000 = 1,6/1.000.000$

$MTBF[SAI+BYP] = 1/ \lambda_{(3+1)[SAI+BYP]} = 625.000 \text{ h}$

Disponibilidad:

$$A_{[(n+1)SAI+BYP]} = \frac{MTBF_{[(n+1)SAI+BYP]}}{MTBF_{[(n+1)SAI+BYP]} + MTTR_{[(n+1)SAI+BYP]}}$$

Para n=1  $A(1+1) = 1.250.000 / (1.250.000 + 12) = 0,9999904$  (5 nuevas)

Para n=2  $A(2+1) = 833.333 / (833.333 + 18) = 0,9999978$  (5 nuevas)

Para n=3  $A(3+1) = 625.000 / (625.000 + 24) = 0,9999616$  (4 nuevas)

**Cálculo del MTBF para un sistema SAI paralelo redundante (n+m) (MTBF(n+m)SAI+BYP)**

Tasa de Fallo:

$$\begin{aligned} \lambda_{[(n+m)SAI+BYP]} &= (\lambda_{[SAI1]} // \lambda_{[SAI2]} \dots // \lambda_{[SAI(n+1)]}) \\ &\quad // \lambda_{[SAI(n+2)]} \dots // \lambda_{[SAI(n+m)]}) + \\ &\quad + (n+m) \times \lambda_{[PBUS]} + \\ &\quad + (\lambda_{[BYP1]} // \lambda_{[BYP2]} \dots // \lambda_{[BYP(n+1)]}) \\ &\quad // \lambda_{[BYP(n+2)]} \dots // \lambda_{[BYP(n+m)]}) \\ &\approx (n+1) \lambda_{PBUS} \end{aligned}$$

Fiabilidad:

$$MTBF(n+m)[SAI+BYP] = 1 / \lambda(n+m)[SAI+BYP]$$

Disponibilidad:

$$A_{[(n+m)SAI+BYP]} = \frac{MTBF_{[(n+m)SAI+BYP]}}{MTBF_{[(n+m)SAI+BYP]} + MTTR_{[(n+1)SAI+BYP]}}$$

La fiabilidad de un SAI paralelo redundante (n + m) depende en gran medida de la tasa de fallo del bus paralelo, que es el único punto de fallo. Las cadenas de SAI en paralelo-redundante, los interruptores de bypass estático y su electrónica de control, así como la tensión de red son todos elementos redundantes y tienen, por tanto, menor o incluso un impacto insignificante sobre la fiabilidad general.

Las siguientes constantes se utilizan en los cálculos:

MTBFM = 50 horas, esta cifra representa una red 'buena calidad'

$\lambda_{PBUS} = 0,4$  por millón de horas

$$\lambda_{(n+m)}[\text{SAI+BYP}] = (\lambda_{\text{SAI1}}/\lambda_{\text{SAI2}} \dots / \lambda_{\text{SAI}(n+1)} / \lambda_{\text{SAI}(n+2)} \dots / \lambda_{\text{SAI}(n+m)}) + (n+m)\lambda_{\text{PBUS}} + (\lambda_{\text{BYP1}}/\lambda_{\text{BYP2}} \dots / \lambda_{\text{BYP}(n+1)} / \lambda_{\text{BYP}(n+2)} \dots / \lambda_{\text{BYP}(n+m)}) \sim (n+1)\lambda_{\text{PBUS}}$$

porque el término  $(\lambda_{\text{SAI1}}/\lambda_{\text{SAI2}} \dots / \lambda_{\text{SAI}(n+m)})$  suponiendo  $n=2$  y  $m=2 \rightarrow$

$$= (\lambda_{\text{SAI1}} \times \lambda_{\text{SAI2}} \times \lambda_{\text{SAI3}} \times \lambda_{\text{SAI4}}) \times (\text{MTTR}[\text{SAI1}] + \text{MTTR}[\text{SAI2}] + \text{MTTR}[\text{SAI3}] + \text{MTTR}[\text{SAI4}]) =$$

$$= (1/20.000) \times (1/20.000) \times (1/20.000) \times (1/20.000) \times (4 \times 6) = 0,00005 \times 0,00005 \times 0,00005 \times 0,00005 \times 24 = 1,5 \text{ exp } -16$$

Para  $n=4 \rightarrow 9,38 \text{ exp } -21$

Para  $n=5 \rightarrow 5,63 \text{ exp } -25$

Cifras muy pequeñas de tasa de fallo

Y el término  $\dots / \lambda_{\text{BYP}(n+m)}$  suponiendo  $n=2$  y  $m=2 \rightarrow$

$$= (\lambda_{\text{BYP1}} \times \lambda_{\text{BYP2}} \times \lambda_{\text{BYP3}} \times \lambda_{\text{BYP4}}) \times (\text{MTTR}[\text{BYP1}] + \text{MTTR}[\text{BYP2}] + \text{MTTR}[\text{BYP3}] + \text{MTTR}[\text{BYP4}]) =$$

$$= ((2/1.000.000) \times (2/1.000.000) \times (2/1.000.000) \times (2/1.000.000)) \times (4 \times 6) = 3,8 \text{ exp } -22$$

Cifra aún más pequeña.

Por lo tanto la fórmula se resume en  $\lambda_{(n+m)}[\text{SAI+BYP}] = (n+m) \times \lambda_{\text{PBUS}} = (n+m) \times 0,4/1.000000$

$$\text{Para } n=2 \text{ y } m=2 \rightarrow \lambda_{(1+1)}[\text{SAI+BYP}] = (2+2) \times \lambda_{\text{PBUS}} = (2+2) \times 0,4/1.000000 = 1,6/1.000.000 = 1,6 \text{ exp } -5$$

$$\text{MTBF}[\text{SAI+BYP}] = 1 / \lambda_{(2+2)}[\text{SAI+BYP}] = 625.000 \text{ h}$$

$$\text{Para } n=3 \text{ y } m=3 \rightarrow \lambda_{(3+3)}[\text{SAI+BYP}] = (3+3) \times \lambda_{\text{PBUS}} = (3+3) \times 0,4/1.000000 = 2,4/1.000.000$$

$$= 2,4 \text{ exp } -5$$

$$\text{MTBF}[\text{SAI+BYP}] = 1 / \lambda_{(3+1)}[\text{SAI+BYP}] = 416.666 \text{ h}$$

### Disponibilidad:

Según la expresión

$$\text{Para } n=1 \ A(2+2) = 1.250.000 / (1.250.000 + 12) = 0,999971 \text{ (4 nueves)}$$

$$\text{Para } n=2 \ A(3+3) = 416.666 / (416.666 + 18) = 0,999956 \text{ (4 nueves)}$$

Como conclusión a dichos cálculos se puede apreciar que una configuración  $n+m$  no tiene que aumentar la disponibilidad del sistema SAI con respecto a la solución  $n+1$ , debido fundamentalmente a la criticidad de la conexión paralelo.

## Comparación de las Configuraciones de SAI

En el caso de la cadena de un SAI individual (rectificador, batería y el inversor), la fiabilidad de la SAI depende de la fiabilidad del rectificador, bus de continua (baterías) y en mayor medida del inversor.

Al introducir el interruptor de bypass estático, el cual proporciona una reserva de energía de red de suministro, la fiabilidad se incrementará por un factor de seis si MTBF de la red es de 50 horas (de buena calidad) y el tiempo medio de reparación de la SAI es de seis horas. Este nivel de fiabilidad no es, por desgracia, suficiente porque todavía depende sustancialmente de la fiabilidad de la red eléctrica y de la calidad de la organización posventa SAI (tiempo de respuesta, el tiempo de viaje, el tiempo de reparación, etcétera). Las cargas críticas modernas no pueden confiar en la calidad de la red y en los tiempos de reparación más largos.

Para superar la dependencia de la red eléctrica, se recomiendan las configuraciones de SAI paralelo redundante  $n + 1$ . La desventaja del clásico SAI "Stand Alone" en configuración paralelo redundante  $n + 1$  es el tiempo de reparación relativamente largo de la SAI (normalmente de 6 a 12 horas).

Mediante la implementación modular, intercambiable en caliente, de los sistemas paralelo redundantes basados en tecnología modular ( $n + 1$ ), la carga crítica será completamente independiente de red. Un módulo SAI defectuoso puede ser reemplazado sin la necesidad de transferir los módulos SAI operativos a bypass. Además, la sustitución de los módulos se hace en un máximo de 0,5 horas, lo que disminuye drásticamente el tiempo de reparación en comparación con sistemas paralelos tradicionales.

El siguiente ejemplo muestra el impacto en la Fiabilidad y la Disponibilidad de la opción de SAI tradicional en configuración paralelo redundante (1 + 1) en comparación con un sistema modular en configuración paralelo redundante (4 + 1).

## Comparación Configuración (n+1) SAI "Stand Alone" vs Modular

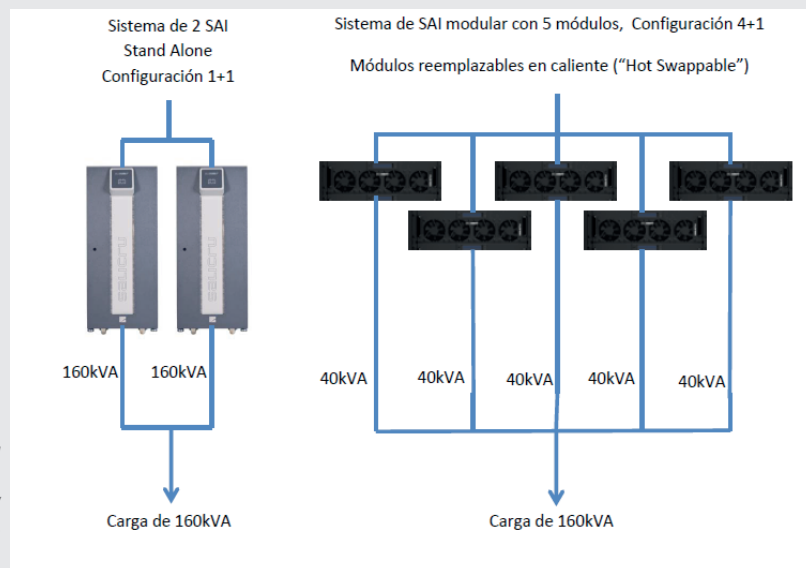


Figura 5: Diagrama de bloques de las dos configuraciones de SAI redundantes, Sistema "Stand-Alone" paralelo redundante (1+1) y Sistema Modular paralelo redundante (n+1).

La Figura 5 muestra un diagrama de bloques de dos configuraciones de SAI redundantes. El sistema de la izquierda representa un Sistema "Stand-Alone" paralelo redundante (1 + 1), mientras que el sistema en el lado derecho representa un Sistema Modular paralelo redundante (n+1) con módulos intercambiables en caliente.

La Disponibilidad (A) es un parámetro importante en la evaluación de la fiabilidad de configuraciones de SAI. A se define como:

$$A = \frac{\text{MTBF [SAI]}}{\text{MTBF [SAI] + MTTR [SAI]}}$$

En la siguiente tabla (Tabla 2.) se muestra una comparativa en datos de fiabilidad y disponibilidad de ambas configuraciones, se consideran dos casos:

1. Ambas configuraciones de SAI tienen los mismos MTTR\_[SAI], a seis horas.
2. Las configuraciones tradicionales de SAI stand-alone tiene MTTR\_[SAI] de seis horas, mientras que la configuración de SAI modular con módulos intercambiables en caliente tienen MTTR\_[SAI] de 0,5 horas.

	Configuración Redundante (1+1) Stand-Alone	Configuración Redundante (4+1) Stand Alone o Modular
<b>1) Comparativa Stand Alone (1+1) vs (4+1)</b>	Stand Alone	Stand Alone
MTBF	1.250.000 h	500.000 h
MTTR	6 h	6h
A	<b>0,999952 (5 nueves)</b>	0,9999888 (4 nueves)
<b>2) Comparativa Stand Alone (1+1) vs Modular (4+1)</b>	Stand Alone	Modular
MTBF	1.250.000 h	500.000 h
MTTR	6 h	0.5 h
A	0,999952 (5 nueves)	<b>0,9999990 (6 nueves)</b>

*Tabla 2. Comparación de las disponibilidades de las dos configuraciones (1 + 1) y (4 + 1) en los dos casos de MTTR considerados.*

En el caso 1), la disponibilidad de la configuración redundante (1 + 1) es mayor que la disponibilidad que la configuración redundante (4 + 1) si el MTTR es el mismo para ambas configuraciones. Esto es debido al hecho de que el MTBF de la configuración redundante (1 + 1) es mayor que el MTBF de la configuración redundante (4 + 1).

En el caso 2), la disponibilidad de la configuración redundante (1 + 1) con un mayor MTTR es menor que la disponibilidad de la configuración redundante (4 + 1), debido a disponer de un MTTR mucho más corto.



## Conclusiones

---

En este artículo se han analizado distintos tipos de SAI y también se han introducido una serie de conceptos que nos pueden ayudar a valorar la idoneidad de estos tipos de SAI para aplicaciones críticas de forma cuantitativa. En este sentido se han descrito conceptos como la Tasa de Fallo y el MTBF (Fiabilidad), el MTTR (Tiempo medio para la reparación de una avería) y como afectan todos ellos al parámetro final más importante para una aplicación crítica: la A (Disponibilidad).

Se han visto también una serie de casos que muestran lo importante que es el MTTR para llegar a altas disponibilidades. Si en una de las configuraciones anteriormente redundantes uno de los SAI se avería, habrá un régimen bajo de disponibilidad y el equipo o módulo defectuoso deberá ser reparado o reemplazado lo antes posible con el fin de restaurar la redundancia (alto régimen de disponibilidad). Con los SAI modulares, se consiguen MTTR más cortos y, en consecuencia, mayores disponibilidades, incluso aunque el número de módulos en paralelo sea mayor.

También se ha visto que desde el punto de vista de Fiabilidad y Disponibilidad, la mejor opción es un Sistema Modular Paralelo Redundante (n+1). Sorprendentemente, según los cálculos realizados, la configuración (n+m) siendo  $m > 1$ , no mejora la Fiabilidad de la configuración (n+1), dado que en este estudio se considera que la tasa de fallos del Bus paralelo es la más significativa del sistema.

Por supuesto queda aún un largo camino por recorrer en la mejora general de las prestaciones y en la mejora tanto del rendimiento eléctrico de cada módulo como de la eficiencia en la gestión del sistema modular completo, pero será sin duda en el ámbito de los sistemas modulares donde se concentrará el desarrollo de los SAI del futuro.

***Por lo tanto y respondiendo a la pregunta ¿Son realmente más fiables?, podemos concluir que los Sistemas modulares representan el último eslabón en la cadena evolutiva de los Sistemas de Alimentación Ininterrumpidas para aplicaciones críticas ya que mejoran la disponibilidad de energía manteniendo o en muchos casos incrementando la fiabilidad de los sistemas clásicos.***