Apoio
CLAMPER
afap
Blutrafos
MEGABARRE

Capítulo VI

Cálculos de confiabilidade e disponibilidade

Luis Tossi

Neste capítulo mostraremos quais critérios e métodos são utilizados quando realizamos os cálculos de confiabilidade e disponibilidade de equipamentos, bem como de sistemas e/ou configurações de UPSs e demais componentes, visando a um aumento destes valores.

Confiabilidade

A palavra confiabilidade vem do radical fiabilidade que significa (definição sistêmica): a capacidade de uma pessoa ou sistema de realizar e manter seu funcionamento em circunstâncias de rotina, bem como em circunstâncias hostis e inesperadas.

Em sistemas UPS ou de missão crítica, a confiabilidade de um equipamento ou sistema pode ser medida ou aferida com base em cálculos estatísticos de componentes que são utilizados na construção destes produtos e associados para formar subpartes que irão compor o todo.

Estes parâmetros estatísticos podem ser aferidos pelos fabricantes com dados colhidos em campo (durante a vida útil deste produto). Este princípio de aferição (aferição com análises de dados reais) lida com dados coletados em campo pelos fabricantes de UPS. São consideradas as falhas como mortalidade prematura (logo no início da operação do componente), falhas de longa duração e também falhas aleatórias. Em componentes ou produtos em que os dados de campo não estão disponíveis, são utilizados métodos padrões de predição.

Quando um equipamento eletrônico é projetado, além de sua operacionalidade, leva-se em conta a engenharia de soluções, que busca que ele funcione por um determinado período de tempo sem falhas.

Em sistemas de missão crítica, a principal consideração da confiabilidade é o cálculo da probabilidade de um sistema derrubar a carga. Este cálculo é baseado não apenas na falha de um componente e/ou parte, mas sim no impacto que esta falha ocasiona no todo. Este cálculo dependerá dos componentes da UPS, da sua topologia, das associações e/ou de como estão sendo empregados e utilizados.

O termo utilizado para medir a probabilidade de falha de um componente ou sistema é MTBF (Mean Time Between Failures), que, em uma tradução livre para o português, é algo como “tempo médio entre falhas”, ou seja, de quanto em quanto tempo pode ocorrer uma falha no componente ou no produto em análise.

Outro termo muito importante para a análise de disponibilidade é o tempo médio em que um componente ou sistema em pane leva para ser diagnosticado e reparado. Ou seja, o tempo entre uma

falha ocorrer e ser reparada, voltando o componente ou sistema às suas condições normais de operação.

Este termo é conhecido como MTTR (Mean Time To Repair), ou tempo médio de reparo. Este parâmetro é tão ou mais importante em um sistema de missão crítica, pois em sistemas em que há redundância um componente pode falhar sem que esta falha ocasione o desligamento da carga. Entretanto, se esta falha não é rapidamente solucionada, aumenta-se a probabilidade de que o equipamento que permaneceu operando também falhe, derrubando a carga crítica.

Princípios de cálculo de disponibilidade

Disponibilidade pode ser definida como "por quanto tempo um componente ou sistema é disponível para uso de forma como foi projetado". Estatisticamente, disponibilidade é definida pela relação entre a confiabilidade dividida pela soma da confiabilidade mais o tempo de reparo em caso de falha (ver relação a seguir).

Disponibilidade A = MTBF/(MTBF + MTTR)

Vemos que esta relação só será igual a 1, ou 100% se tivermos o MTTR igual a zero.

Portanto, a disponibilidade de um sistema será sempre inferior a 100%. E em sistemas de missão crítica busca-se que o sistema tenha uma configuração com o maior número de 9 após a vírgula, ou seja, 99,999%.

Um sistema ótimo de missão crítica busca a máxima disponibilidade possível (maior número de 9) e, conforme associamos componentes e sistemas, podemos comparar sua efetividade em bases de quanto mais disponível este sistema estiver apto ao uso. O MTBF de um componente ou sistema é sempre calculado com base no MTBF de cada componente individual, como retificador, bateria, inversor etc. Os MTBFs destes componentes podem ser levantados com base em dados reais de operação em campo, mas quando estes dados não estão disponíveis devem ser utilizados handbooks ou referências (como o Databook MIL-HDBK 217), onde podem ser encontradas as referências pessimistas de operação de componentes e suas formas de associação básicas (por exemplo, uma ponte inversora de 6 pulsos de IGBT).

A Tabela 1 será utilizada como referência de valores para os cálculos de disponibilidade, sendo que se dividiu uma UPS dupla conversão nos conjuntos principais, nela contida.

Como em cálculos estatísticos, utilizamos □ que é 1/MTBF. Este valor também consta da tabela.

Como também já foi mencionado, o MTTR é outro fator importante no cálculo da disponibilidade e também faz parte da tabela. Estamos levando em conta que uma falha possa ser corrigida em 10 horas, sendo que entre o alarme da falha e a chegada do técnico em campo temos de 7 a 8 horas e o restante do tempo para completar as 10 horas em ação para reparo no equipamento. Leva-se também em conta que existem sobressalentes disponíveis no site, ou

Apoio
CLAMPER
aFap
Blutrafos
MEGABARRE

em poder do técnico dentro deste período de detecção/transporte.

Lembramos que o UPS ou outros componentes de uma instalação de missão crítica utilizam partes mecânicas (contatores, molas, relés, ventiladores, etc.) e capacitores eletrolíticos, que necessitam de manutenção e/ou tem vida útil predeterminada pelos fabricantes.

Tabela 1 – Referência de valores para os cálculos de disponibilidade

Componente	MTBF (h)	λ (10^{-6})	MTTR ou R (h)
Retificador	200 K	$\lambda_L = 5$	$R_L = 10$
Bateria	100 K	$\lambda_B = 10$	$R_B = 10$
Inversor	130 K	$\lambda_W = 7,7$	$R_W = 10$
Chave estática na saída do inversor	1250 K	$\lambda_{WS} = 0,8$	RWS = 10
Chave estática na rede reserva	1250 K	$\lambda_S = 0,8$	RS = 10
Controle da chave estática	2000 K	$\lambda_{SC} = 0,5$	RSC = 10
Rede comercial	100	$\lambda_N = 104$	RN = 0,1
Controle de paralelismo	2000 K	$\lambda_P = 0,5$	RP = 10

Nos cálculos dos sistemas apresentados, serão utilizadas as seguintes relações matemáticas e fórmulas:

Disponibilidade:

$A = MTBF/(MTBF+MTTR)$

$MTBF = 1/\lambda$

$MTTR = r$

Associação paralela de componentes:

$\lambda=(\prod_k \lambda_k * r_k) * (\sum_k / r_k)$ $\quad r = 1/(\sum_k / r_k)$

Associação série de componentes:

$\lambda = \sum_k \lambda_k$ $\quad r = (\sum_k \lambda_k * r)/(\sum_k / r_k)$

Associação paralela redundante de (n - 1 até n ≤ 10)

$\lambda = n*(n-1)*(\lambda_k)^2 * rk$ $\quad r = 0,5 / r_k$

Nota:

$\sum_k P_k$ para P1+P2+P3 .....

$\prod_k P_k$ para P1+P2+P3 .....

Exemplos de cálculos

Começaremos nossos cálculos montando uma UPS hipotética sem rede reserva, ou seja, composta apenas por retificador (alimentado pela rede comercial), baterias e inversor.

Também utilizaremos o conceito de que em eletricidade as falhas podem ser falhas condutivas ou não condutivas. Isto significa que um componente pode apresentar uma falha e interromper a condução de energia por ele ou pode falhar e entrar em curto-circuito, ou seja, falha, mas continua conduzindo.

Levaremos em conta que as falhas não condutivas (nc) são quatro vezes mais prováveis de acontecer do que as falhas condutivas (short circuit ou falhas sc). Sendo assim teremos:

$\lambda = (\lambda_{nc} + \lambda_{sc})$ sendo, $\lambda_{nc} = 0,8 * \lambda$ e $\lambda sc = 0,2 * \lambda$

O esquema unifilar mostra os blocos de referência para melhor compreensão.

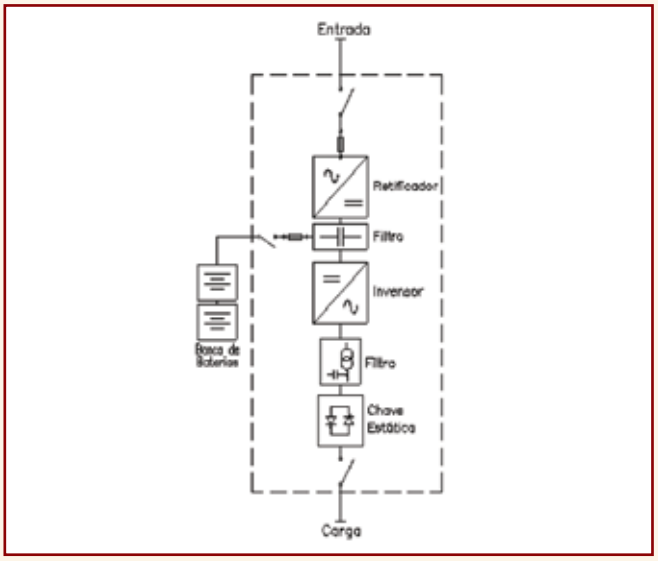

Figura 1 – Esquema unifilar dos blocos de referência.

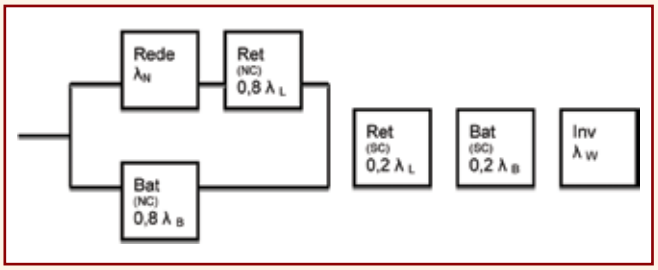

Figura 2 – Diagrama de bloco mostra a associação básica dos componentes.

$\lambda_{UPS} = (\lambda N * 0,8 \lambda B * r) + 0,2 \lambda_L + 0,2 \lambda_B + \lambda_W$

$\lambda UPS = ((10^{-4} * 10^{-6})*(0,8*10*10^{-6})*10) + (0,2 * 5 * 10^{-6}) + ...$
$.... (0,2 * 10 * 10^{-6}) + (7,7 * 10^{-6}) = 11,5 * 10^{-6}$

$MTBF_{UPS} = 1 / \lambda_{UPS} = 87$ kh

$r_{UPS} = 10$ h

$Disp_{UPS} = MTBF_{UPS} / (MTBF_{UPS} + r_{UPS}) = 0,9998851$ ou 99,9851%

Uma vez que já temos os cálculos de um bloco UPS sem rede reserva e chave estática, vamos inserir este bloco para formar uma UPS singela, com rede reserva, chave estática de transferência automática (no lado da rede reserva e também no lado do inversor).

Apoio
CLAMPER
aFap
Blutrafos
MEGABARRE

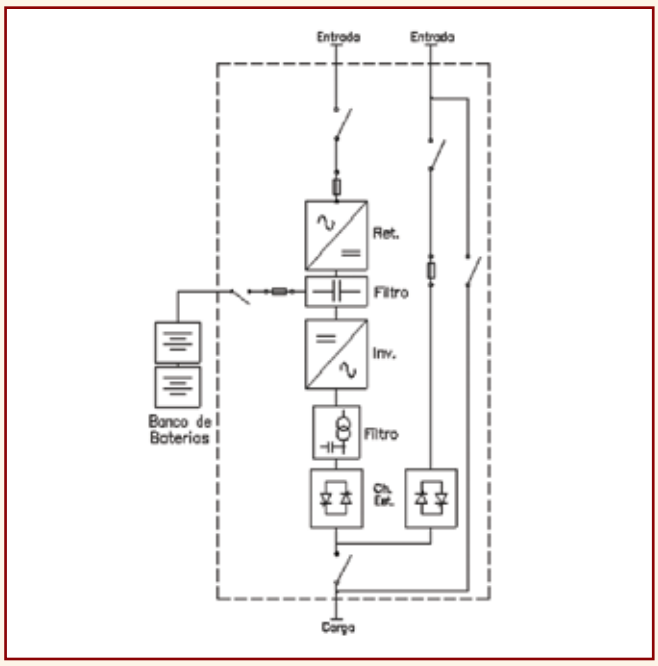

Figura 3 – Esquema unifilar mostra um UPS dupla conversão completo.

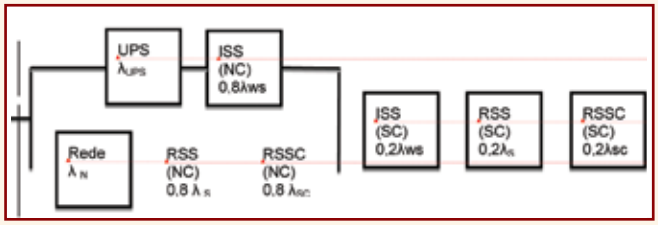

Figura 4 – Diagrama de blocos apresenta o conjunto completo de UPS.

$\lambda_{Sist} = (\lambda_{UPS} + 0{,}8\,\lambda_{WS}) * \lambda_N * r_{UPS} + 0{,}2\,\lambda_{WS} + 0{,}2\,\lambda_S + 0{,}2\,\lambda_{SC}$

$= (11{,}5*10^{-6} + 0{,}8*0{,}8*10^{-6})* 10^{-2} * 10 + 0{,}2 *0{,}8 * 10^{-6} + ...$
$.... 0{,}2 * 0{,}8 *10^{-6} + 0{,}2 * 0{,}5 * 10^{-6} = 1634 * 10^{-6}$

$MTBF_{UPS} = 1/\lambda_{UPS} = 612$ kh

$r_{UPS} = 10$ h

$Disp_{UPS} = MTBF_{UPS} / (MTBF_{UPS} + r_{UPS}) = 0{,}9999836$ ou 99,99836%

Do cálculo anterior, pode ser observado que a disponibilidade aumenta muito com a presença de um caminho alternativo ao circuito de dupla conversão do UPS. Deve ficar claro ao leitor que o que está sendo medido é a probabilidade de queda da carga que está sendo alimentada. Isso é a disponibilidade do sistema.

Com o objetivo de aumentar a disponibilidade de operação da carga, podem ser associados vários UPSs na configuração chamada paralelo ou sistemas duais. Nos próximos exemplos, vamos associar UPSs em paralelo para que possa ser notado o aumento da disponibilidade do sistema.

O diagrama de blocos a seguir mostra a configuração paralela redundante de dois UPSs com chave estática distribuída, ou seja, cada UPS tem sua própria chave estática.

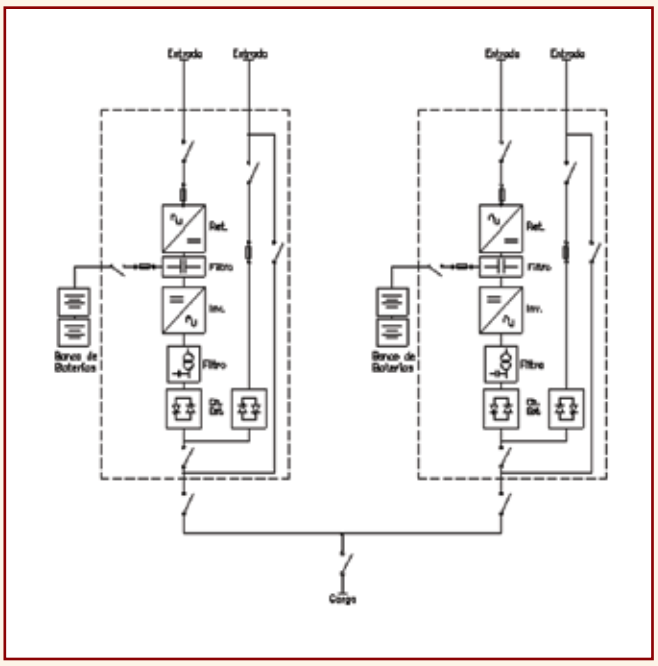

Figura 5 – Diagrama de blocos mostra configuração paralela redundante de dois UPSs.

A tradução deste diagrama em blocos dos MTBFs é mostrada na sequência:

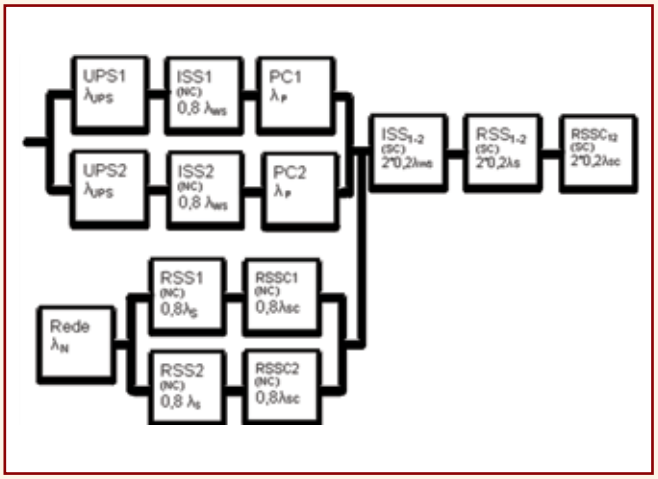

Figura 6 – Tradução do esquema da Figura 5 em diagrama de blocos dos MTBFs.

$\lambda_{Sist} = 0{,}4\lambda_{WS} + 0{,}4\,\lambda_S + 0{,}4\lambda_{SC} = 0{,}84 * 10^{-6}$

$MTBF_{SIST} = 1 / \lambda_{UPS} = 1190$ kh

$r_{SIST} = 10$ h

$Disp_{SIST} = MTBF_{SIST} / (MTBF_{SIST} + r_{SIST}) = 0{,}9999915$ ou 99,99915%

Agora vamos mostrar um sistema paralelo redundante com chave estática centralizada, ou seja, cada UPS tem apenas o ramo de dupla conversão e a chave estática de emergência é apenas uma para todo o sistema. A chave estática de emergência tem obrigatoriamente a potência de todo o sistema.

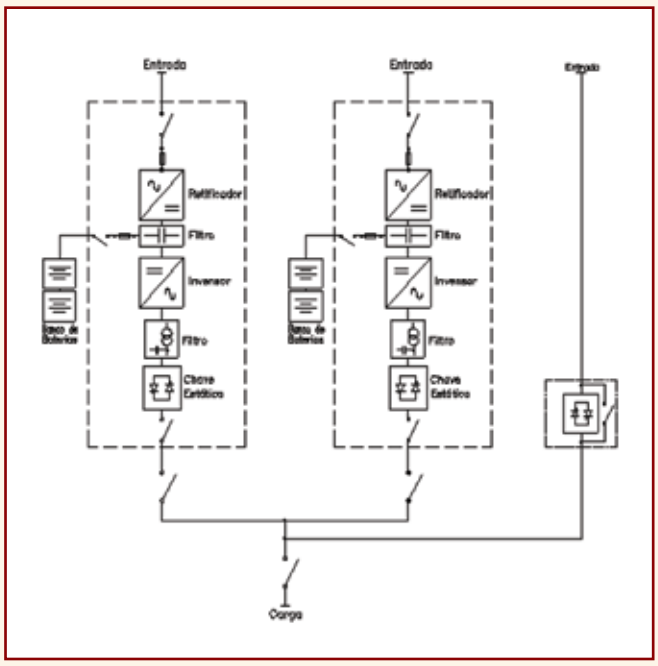

Figura 7 – Diagrama de blocos do sistema.

$\lambda_{Sist} = 0{,}4\lambda_{WS} + 0{,}2\,\lambda_{P} + 0{,}2\lambda_{S} + 0{,}2\lambda_{SC} = 0{,}68 * 10^{-6}$

$MTBF_{SIST} = 1 / \lambda_{UPS} = 1470$ kh

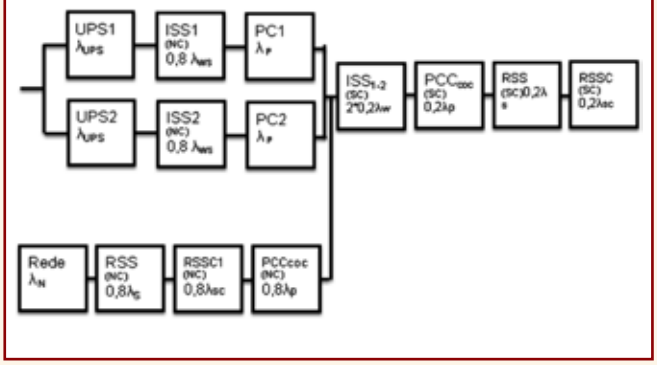

Figura 8 – Tradução do diagrama da Figura 7 em termos de cálculo de disponibilidade.

$r_{SIST} = 10$ h

$Disp_{SIST} = MTBF_{SIST} / (MTBF_{SIST} + r_{SIST}) = 0{,}9999932$ ou 99,99932%

Para demonstrarmos o cálculo de mais de duas unidades em paralelo, vamos mostrar o diagrama de blocos de um sistema de três UPS e paralelo redundante 2+1. Isto significa que são necessárias duas UPS operando para que a carga seja mantida. Quando as três UPSs estão operando, cada uma alimenta 1/3 da carga. Se uma falha ocorre em uma das três UPSs, as duas remanescentes passam a alimentar 100% da carga até que a terceira seja reparada.

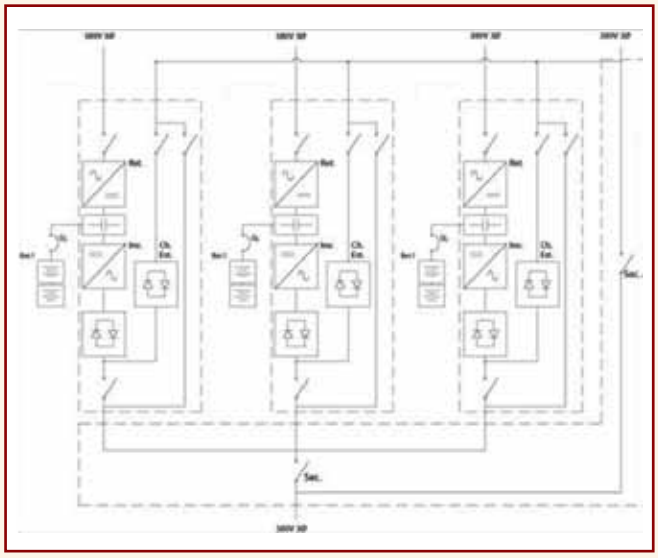

Figura 9 – Diagrama de blocos de um sistema de três UPSs e paralelo redundante 2 + 1.

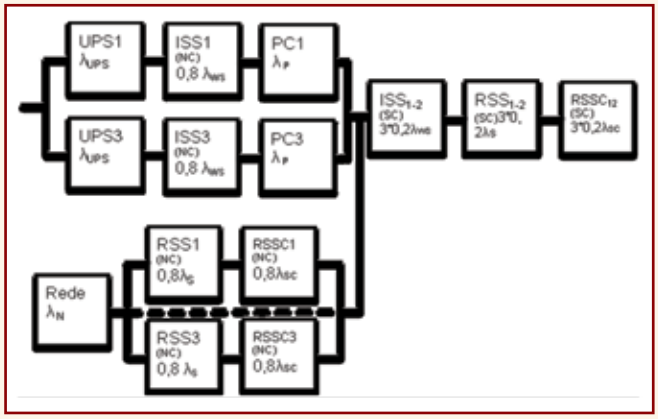

Figura 10 – Diagrama de blocos representa a tradução em blocos para o cálculo de disponibilidade.

$\lambda_{Sist} = 0{,}6\lambda_{WS} + 0{,}6\lambda_{S} + 0{,}6\lambda_{SC} = 1{,}26 * 10^{-6}$

$MTBF_{SIST} = 1 / \lambda_{UPS} = 794$ kh

$r_{SIST} = 10$ h

$Disp_{SIST} = MTBF_{SIST} / (MTBF_{SIST} + r_{SIST}) = 0{,}9999874$ ou 99,99874%

A partir de três unidades em paralelo redundante, temos a queda significativa do MTBF conforme adicionamos mais módulos, pois o multiplicador de módulos só vai aumentando (0,8 p 4 módulos, 1 para 5 módulos até 1,6 para 8 UPS).

O diagrama a seguir mostra o cálculo de disponibilidade para um sistema paralelo não redundante (ou paralelo por potência). Neste caso, são necessários dois UPSs para que o sistema possa ser alimentado. Se um UPS falha, o outro entra em sobrecarga e a carga é transferida para a rede reserva (by pass) até o sistema ser reparado.

O diagrama unifilar é o mesmo do sistema paralelo distribuído já apresentado anteriormente.

Figura 11 – Cálculo de disponibilidade para um sistema paralelo não redundante.

$\lambda_{Sist} = (2*\lambda_{UPS} + 2*0{,}8\ \lambda_{WS} + 2*\lambda_{P}) * (\lambda_{N} + 2*0{,}8\ \lambda_{S} + 2*0{,}8\ \lambda_{SC}) \ldots$
$\ldots * r_{UPS} + (0{,}4*\lambda_{WS} + 0{,}4\ \lambda_{S} + 0{,}4\ \lambda_{SC}) =$

$= (25{,}28*10^{-6}) * (10^{-2}) * 10 + (0{,}84 * 10^{-6}) = 3368 * 10^{-6}$

$MTBF_{UPS} = 1/\lambda_{UPS} = 297$ kh

$r_{UPS} = 10$ h

$Disp_{UPS} = MTBF_{UPS}/(MTBF_{UPS} + r_{UPS}) = 0{,}9999663$ ou 99,99663%

A seguir, demonstraremos o esquema unifilar de um sistema redundante N + N para alimentar cargas com fontes duais. Neste tipo de sistema existem dois sistemas UPS alimentando dois barramentos distintos de saída, ou seja, cada UPS alimenta um barramento de distribuição desde sua saída até a alimentação da carga.

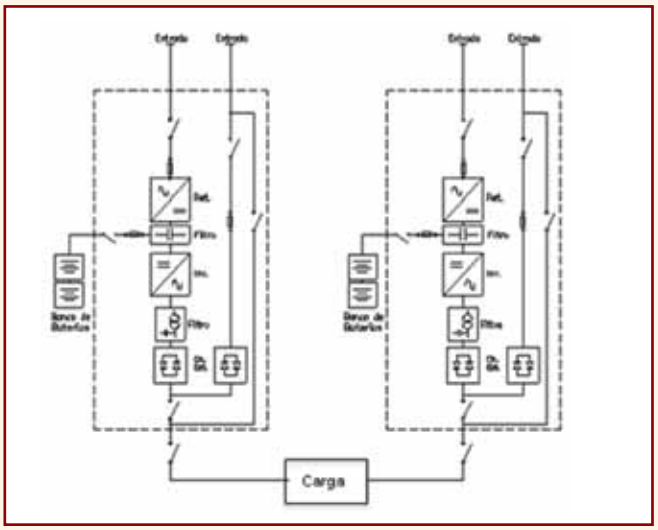

Figura 12 – Esquema unifilar de um sistema redundante N + N para alimentar cargas com fontes duais.

Traduzindo para o diagrama de confiabilidade temos:

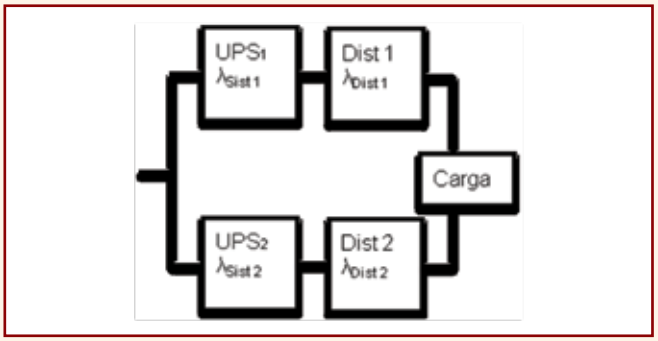

Figura 13 – Tradução do esquema anterior para o diagrama de confiabilidade.

$\lambda_{Carga} = (\lambda_{Sist}\ 1 + \lambda_{Dist}\ 1) * (\lambda S_{ist\ 2} + \lambda_{Dist\ 2}) * r_{Sist} * 2 =$

$= (1634*10^{-6} + 20 * 10^{-6}) * (1634*10^{-6} + 20 * 10^{-6}) * 10 * 2 = 9{,}36 * 10^{-9}$

$MTBF_{UPS} = 1/\lambda_{UPS} = 106830$ kh

$r_{UPS} = 10$ h

$Disp_{UPS} = MTBF_{UPS} / (MTBF_{UPS} + r_{UPS}) = 0{,}9999999$ ou 99,99999%

Este resultado mostra que a associação de sistemas duais será sempre a melhor solução em termos de disponibilidade, pois além de agregar alta disponibilidade e dois UPSs singelos (612 kh), levamos a redundância em circuitos de distribuição (que têm altíssima disponibilidade) até a alimentação da carga.

Conclusão

De todos os resultados apresentados, podemos ver que a maior disponibilidade para uma instalação de missão crítica sempre será o sistema dual bus. Acontece que nem sempre o sistema dual é aplicável. Os sistemas paralelos redundantes também podem ser considerados uma boa solução de redundância, desde que devidamente projetados e que se tenha a ciência de que sistemas paralelos sempre apresentam um ponto único de falha.

Deve ser observado que soluções que consideram paralelo por potência nem sempre são boas soluções, visto que sua disponibilidade é sempre inferior à disponibilidade de uma UPS singela.

No entanto, vale a ressalva que os cálculos de disponibilidade podem ser utilizados como uma ferramenta de comparação entre soluções propostas e nunca como único motivo de decisão de uma instalação de missão crítica. Também vale notar que instalações redundantes normalmente são bastante ineficientes em termos de perdas energéticas, o que será discutido em capítulos futuros.

***LUIS TOSSI** é engenheiro eletricista e diretor-geral da Chloride Brasil. Atua na área de condicionamento de energia e aplicações de missão crítica há 23 anos, com larga experiência em produtos, aplicações e tecnologias de ponta.*

Continua na próxima edição
Confira todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail redacao@atitudeeditorial.com.br