

# Digitalização de Subestações e Energias Renováveis

A integração das fontes de energias renováveis nas redes elétricas, impulsionada pela digitalização, está remodelando o paradigma da geração, distribuição e consumo de energia. Para abordar os desafios relacionados a este assunto, convidamos o Engenheiro Master da Vale, Paulo Henrique Vieira Soares. Mestre em engenharia Elétrica pela UNIFEI, possui MBA em Gestão (FGV) e pós-graduação em Sistemas fotovoltaicos pela UFV.



## Capítulo 7

### Operação e Manutenção (O&M) de centrais geradoras fotovoltaicas e subestações digitais

Por Paulo Henrique Vieira Soares e \*Paulo Alberto Viana Vieira

#### 1 - INTRODUÇÃO

Este artigo aborda aspectos contemporâneos na operação de subestações e centrais geradoras, focando em pontos frequentemente negligenciados. Os projetos atuais buscam incorporar as mais recentes tecnologias disponíveis no mercado. No entanto, a falta de expertise da equipe de implantação e a baixa capacitação das equipes de operação e manutenção (O&M) podem representar grandes desafios para a gestão, impactando

diretamente a disponibilidade e a confiabilidade das operações.

No Capítulo 2 deste fascículo (edição 201), é apresentada a arquitetura completa de uma subestação coletora conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN) e seus respectivos níveis (N0, N1, N2 e N3) na hierarquia de controle do sistema elétrico. A Figura 1 ilustra a hierarquia de controle adaptada à pirâmide de automação industrial (já consolidada na literatura), permitindo a compreensão dos principais equipamentos, sistemas e protocolos utilizados.



## 2 - CONTEXTUALIZAÇÃO

### Operador Nacional do Sistema (ONS):

O Operador Nacional do Sistema (ONS), por meio do "Procedimentos de Rede - Módulo 5 - Operação do Sistema", estabelece que as atividades de operação do SIN e a operação das instalações dos agentes são interdependentes e complementares. Assim, os resultados da operação do sistema servem como insumos para a operação das instalações e vice-versa. Nesse contexto, aplica-se a hierarquia baseada no princípio da delegação de autoridade dos níveis superiores para os níveis inferiores, com a prerrogativa de atuação conforme a necessidade em qualquer um dos níveis inferiores.

### ONS e Agentes Fotovoltaicos

O "Manual de Procedimentos da Operação - Módulo 5 - Submódulo 5.14" estabelece o procedimento para a interação entre o ONS e os Conjuntos Fotovoltaicos da Área 500/345 kV de Minas Gerais. Destaca-se que os agentes devem manter equipes em regime de turno ininterrupto para comunicação em tempo real com o COSR-SE (Centro de Operação Sudeste). Além disso, os diagramas unifilares devem ser mantidos atualizados e reportados ao ONS através da rotina operacional RO-MP.BR.05.

### Procedimentos operativos

Durante as ações de controle e carregamento, é essencial que o COSR-SE solicite, se necessário, o controle de tensão e carregamento na rede de operação utilizando os recursos dos Conjuntos Fotovoltaicos. Os Conjuntos Fotovoltaicos devem atender às solicitações do COSR-SE para redespacho de geração no menor prazo possível, especialmente em caso de restrições sistêmicas.

No caso de desligamento total, o agente deve preparar a instalação para a recomposição e o restabelecimento conforme as instruções específicas, informando ao COSR-SE o horário e as condições dos equipamentos no momento da ocorrência e da normalização. Para desligamentos automáticos que impeçam ou restrinjam a geração, a elevação da geração somente pode ocorrer após autorização do COSR-SE. Além disso, qualquer indisponibilidade superior a 10% da capacidade instalada total deve ser comunicada em tempo real ao COSR-SE.

### Centro de Operações do Agente - COS (N3)

O N3 possui diversas atribuições, destacando-se as três principais:

- **Pré-Operação:** Responsável pela programação das intervenções junto ao ONS, Transmissoras e Distribuidoras, apoiando as necessidades dos clientes. Inclui a elaboração de planos de manobras

# Excelência em Transformadores

IRRIGAÇÃO  
ENERGIA FOTOVOLTAICA  
ENERGIA ELÉTRICA  
INDÚSTRIA  
MANUTENÇÃO

# MINUZZI®

[www.minuzzi.ind.br](http://www.minuzzi.ind.br)



para intervenções programadas e a normatização desses processos.

- **Tempo Real:** Encarregado do monitoramento contínuo da planta, incluindo variáveis analógicas e digitais, além dos alarmes dos ativos operados remotamente. Também realiza a execução das manobras de intervenções programadas e não programadas, atendimento a urgências e emergências, e operação remota das unidades geradoras.
- **Pós-Operação:** Responsável pela análise das informações operacionais, emissão de relatórios, e indicadores de disponibilidade e performance. Inclui a análise de eventos operacionais, rotinas de acompanhamento, e a inserção de dados nos sistemas do ONS.

### KPIs – Indicadores de desempenho

A NBR 5462 define “disponibilidade” como a capacidade de um item estar em condições de executar uma função específica em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, desde que aplicado de acordo com as especificações (confiabilidade) e mantido (manutenibilidade) adequadamente.

Para subestações coletoras e parques solares, considerando uma operação contínua de 24 horas (incluindo a geração de energia durante o dia e compensação de potência reativa à noite), a disponibilidade física (DF) dos equipamentos é um dos principais indicadores. Esta disponibilidade pode ser calculada pela seguinte equação:

$$DF = \frac{\text{Horas calendário} - \text{Horas de manutenção}}{\text{Horas calendário}} * 100 (\%)$$

No processo de manutenção, a Disponibilidade Física (DF) é de responsabilidade do time de manutenção de campo (N2, N1 e N0), enquanto a Utilização Física (UF) é de responsabilidade prioritária do N3 e, em contingência, do N2. A UF pode ser calculada pela seguinte equação:

$$DF = \frac{\text{Horas disponíveis} - \text{Horas não utilizadas}}{\text{Horas disponíveis}} * 100 (\%)$$

Considerando que os ativos estão em sua melhor condição de Disponibilidade Física e sendo utilizados durante todo o período, o último indicador, não exaustivo, para garantir uma operação de excelência é o EPI (Energy Performance Index), abordado no capítulo 6 deste fascículo.

### Ciclo de vida

A norma IEC 61850 estabelece diretrizes para assegurar a qualidade ao longo do ciclo de vida dos sistemas, especificando as responsabilidades tanto das concessionárias quanto dos fornecedores. Os fornecedores devem assegurar o desenvolvimento conforme a ISO 9001, realizar testes de sistema e certificações de conformidade com padrões, e fornecer suporte e peças de reposição mesmo após a descontinuação do produto. Dado o avanço contínuo dos Sistemas de Automação de Subestações (SAS) e seus

componentes, é importantíssimo que os sistemas e ferramentas de engenharia sejam claramente identificáveis por meio de versões. Por exemplo, conforme ilustrado na Figura 2, após a descontinuação de um produto, o fabricante deve garantir a disponibilidade de peças de reposição e serviços de reparo por 10 anos, versões de hardware e software por 15 anos, e itens de interfaces adaptáveis por 20 anos.

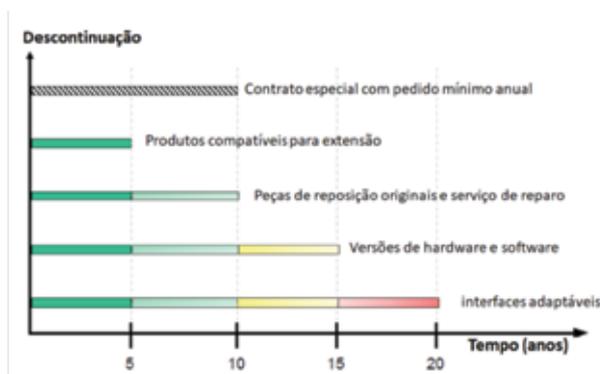


Figura 2 – Período para obrigação de entrega (Fonte dissertação do autor)

## 3- APLICAÇÃO

### Manutenção (Disponibilidade Física)

Subestações de alta tensão e transformadores convencionais são ativos robustos, com alta disponibilidade física (DF), próxima a 100%, para casos estes onde a manutenção esteja em dia e bem executada. Contudo, os principais ativos que impactam diretamente na geração de energia são os rastreadores (trackers) e os inversores. Para otimizar o aproveitamento da área em grandes projetos de geração centralizada, as placas fotovoltaicas são ajustadas para seguir a trajetória do sol durante o dia, utilizando um mecanismo conhecido tracker.

A Figura 3 ilustra a diferença entre a curva vermelha, que representa a modulação das placas em direção ao sol, e a curva azul, que representa o equipamento fixo (posição de segurança). O uso dos rastreadores resulta em um aumento de produção de energia de 25% a 30%, evidenciado pela diferença entre as duas curvas.

O Capítulo IV desta coletânea (Edição 203) descreve a arquitetura mínima do sistema de rastreamento solar e o processo de comissionamento. Após a entrada em operação, é essencial garantir uma alta disponibilidade da rede de comunicação Ethernet, permitindo que os módulos de comunicação em cada tracker se conectem à estação meteorológica para receber a referência de posição do sol e, assim, permitir o rastreamento adequado. Caso haja uma falha na rede de comunicação por alguns minutos, ou ventos acima do limite tolerável, o tracker irá para a posição de segurança, conforme ilustrado na Figura 4, o que pode impactar consideravelmente na geração de energia.



# BR-POWER

Transformador a Seco Média Tensão

## BRVAL

TRANSFORMADORES

A confiabilidade que você precisa  
para o seu projeto, está na **BRVAL**.

✉ vendas@brval.com.br

🌐 [brvalelectrical](#)

🌐 [www.brval.com.br](#)

☎ 21 97105-6853

☎ 11 5199-0141

☎ 21 3812-3100

Conheça nossos  
produtos



# BRVAL

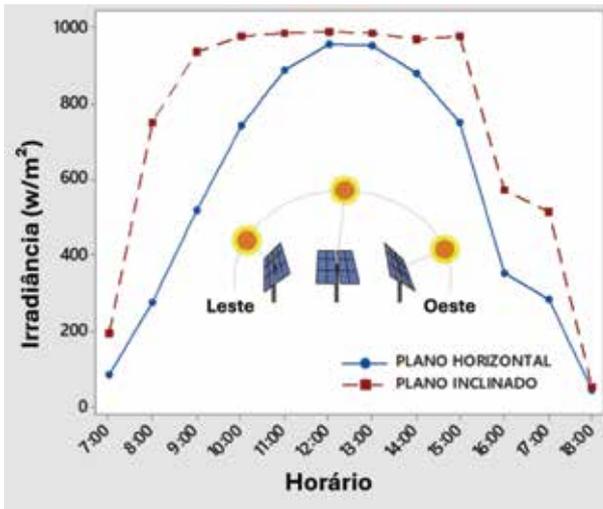


Figura 3 – Curva de irradiância no plano horizontal (GHl) versus plano inclinado (GTI)

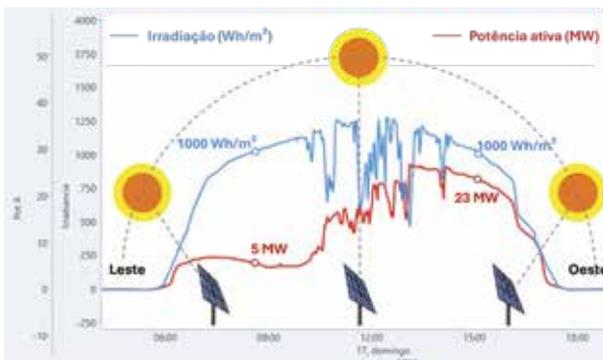


Figura 4 – Falha de modulação das placas solares

### Operação (Utilização Física)

Uma planta de geração de energia solar é projetada para ser autônoma por natureza. Desde o amanhecer, os inversores começam a operar e injetar potência na rede, interrompendo a geração ao final do dia. Esses inversores são projetados para responder rapidamente às variações na irradiância solar, ajustando sua operação em tempo real para otimizar a eficiência e a estabilidade da rede elétrica.

Quando há uma queda brusca na irradiância, como a causada por nuvens, os inversores reduzem imediatamente a quantidade de energia injetada para evitar sobrecargas e instabilidades. Após a passagem das nuvens, os inversores aumentam rapidamente a conversão da energia solar disponível, retornando aos níveis normais de operação. Essa capacidade de resposta ágil é vital para maximizar a utilização da energia gerada e manter a estabilidade da rede elétrica.

A Figura 5 ilustra um dia nublado, demonstrando os impactos do sombreamento de nuvens na corrente dos inversores. Observa-se uma redução da corrente de 600 A para 200 A, o que é típico no início ou no término da geração, e atípico às 10h30. Após a passagem da nuvem, a corrente rapidamente aumenta novamente, superando 500 A no alimentador da SE-Coletora.

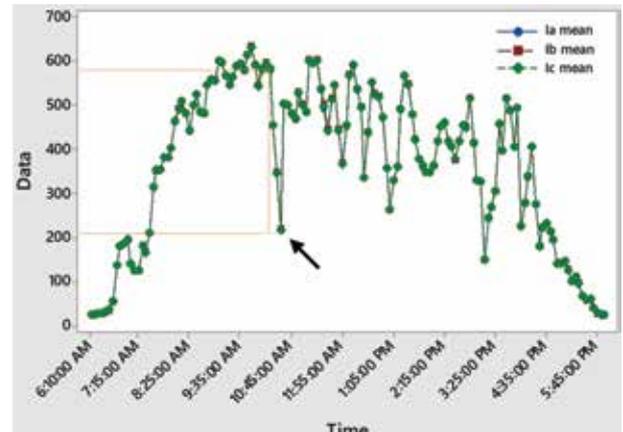


Figura 5 – Afundamento das correntes em função da passagem de nuvens

### Performance

Diversos fatores podem afetar a performance da planta, reduzindo sua capacidade de geração. A limpeza dos módulos fotovoltaicos durante períodos de seca e o controle da vegetação em épocas de chuva são aspectos críticos que devem ser incluídos na manutenção sistemática do O&M. A seguir, será abordado o impacto da temperatura tanto nos inversores quanto nas placas solares.

Inversores solar: O drive solar é projetado para converter a energia contínua (CC) gerada pelos módulos fotovoltaicos em energia alternada (CA), desde que esteja habilitado e operando sem falhas. Antes do nascer do sol, o inversor permanece no estado de “Aguardando Sol”. Assim que a irradiância começa a aumentar, o inversor se sincroniza com a rede e inicia a geração de energia. Em condições normais, o inversor gera energia (potência CA de saída) proporcional à irradiância disponível (potência CC de entrada). No entanto, se a temperatura dos semicondutores, responsáveis pelo chaveamento e conversão de energia, aumenta, o inversor reduz a potência (derating) para preservar a integridade do equipamento, evitando falhas. Na Figura 6, é apresentada a curva que mostra a relação entre a potência de saída do inversor e a temperatura interna do inversor. Observa-se que, quando o inversor atinge um determinado valor de temperatura interna, sua potência tende a reduzir para proteger o equipamento. A curva em azul é fornecida pelo fabricante do inversor, com o objetivo de informar o comportamento de saída em função do aumento da temperatura.

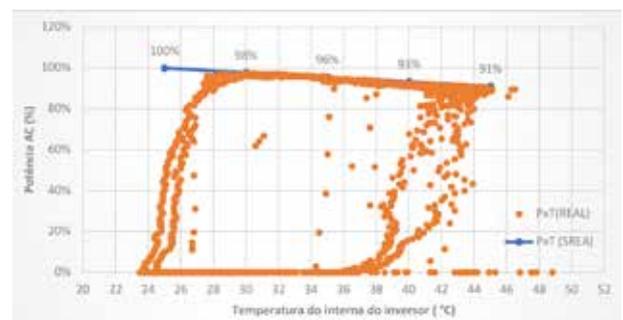


Figura 6 – Curva do inversor apresentando derating

Módulos fotovoltaicos na Figura 7, observa-se que, às 8h da manhã, a temperatura ambiente no parque é de 24 graus Celsius, enquanto a temperatura dos módulos fotovoltaicos é de aproximadamente 40 graus Celsius. Às 9h, a temperatura dos módulos ultrapassa os 50 graus Celsius. Para o O&M, é importante

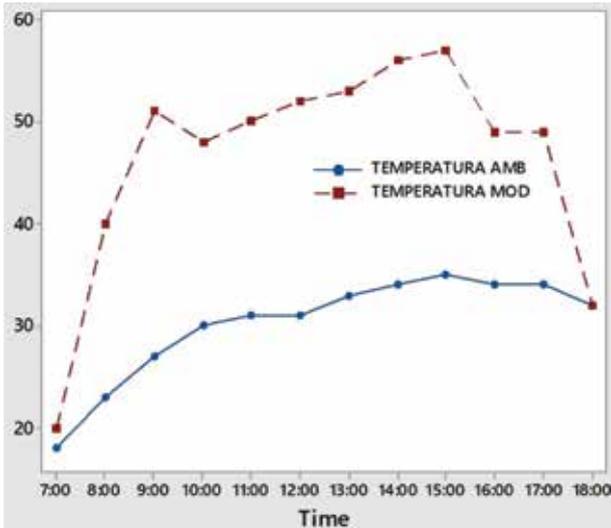


Figura 7 – Curva de temperatura dos módulos versus temperatura ambiente

monitorar esse diferencial de temperatura e seguir as recomendações do fabricante quanto à limpeza dos módulos, evitando o uso de água fria para não danificar o equipamento, e prevenindo, assim, o choque térmico. Além disso, deve-se evitar tocar nos módulos para prevenir acidentes.

**Sensores:** Outro ponto de extrema importância para confiabilidade nos dados de performance da planta, se refere a correta instalação e manutenção dos sensores (piranômetros, PT100 e sensor de sujidade dos módulos fotovoltaicos). Como exemplo o piranômetro, quando não limpo pode ocasionar em um valor subestimado de geração esperada, impactando assim na interpretação dos KPI's.

### Geração de energia

O processo de certificação de energia em sistemas fotovoltaicos começa com a estimativa da Produção de Energia Bruta (PEB), que é calculada com base na capacidade instalada e na irradiação solar disponível no local da usina. No entanto, deve-se considerar as perdas inerentes, como as relativas à temperatura dos módulos falha na orientação ou inclinação dos trackers, sombreamento e sujeira. Essas perdas devem ser descontadas da PEB para determinar a Produção de Energia Certificada (PEC), um parâmetro essencial para o cadastramento e habilitação junto à EPE.

A viabilidade econômica de um projeto solar é fortemente influenciada pela irradiação solar local, que apresenta variabilidade

## Por que o ZYGGOT Arc salva vidas?



## O ZYGGOT Arc

é um sistema inovador de proteção para sistemas elétricos e seus componentes, utilizando uma rede inteligente de sensores que detectam arcos elétricos através da radiação ultravioleta.

Quando um arco elétrico é identificado em sua fase inicial, o sensor Zyggot é ativado instantaneamente, oferecendo a resposta mais rápida do mercado. Ele envia o sinal de trip em apenas 0,3 milissegundos (300 microssegundos), garantindo uma resposta ágil e eficaz.

O sistema opera com um contato estático e um contato seco, além de utilizar uma rede de comunicação digital ultrarrápida (CAN), o que assegura uma eficiência excepcional e tempos de resposta minimizados.

### Características



Não detecta luz visível, o que evita o falso trip



Deteção nas primeiras fases do arco (antes da luz)



Ação ultrarrápida, em menos de 0.3 milissegundos (300us)



Solução que resulta na menor energia incidente do mercado



Ampla área de detecção (90°)



Dispensa leitura de corrente



Visite nosso site para saber mais

e deve ser incorporada ao modelo financeiro do empreendimento. A quantificação do risco associado à PEC é realizada através da análise histórica dos dados de irradiação, que seguem uma distribuição normal, permitindo calcular a probabilidade da PEC ao longo dos anos de operação da usina e fornecendo uma estimativa mais precisa do retorno econômico esperado. Atualmente, a Garantia Física de Energia (GFE) para usinas fotovoltaicas é calculada com base na produção anual estimada, considerando as indisponibilidades programadas e forçadas, o consumo interno e as perdas elétricas. Para usinas fotovoltaicas, utiliza-se o valor de P50 na estimativa de energia.

### Perfil de perda

A seguir, apresenta-se um perfil de perda executiva. Na Figura 8, é possível observar a geração de energia prevista para o mês (linha preta), a energia gerada real (em verde), as perdas associadas a questões de operação e manutenção (em amarelo) e os impactos na geração decorrentes de restrições na capacidade de escoamento (em cinza, indicando o curtailment).



As perdas por operação e manutenção (O&M) devem ser estratificadas de acordo com a família de equipamentos (por exemplo, inversores, strings, trackers, transformadores) e por disciplina (elétrica, automação, civil, operação). Essa abordagem permite uma análise detalhada, alimentando as rotinas de confiabilidade para a tratativa e resolução dos problemas.

### Sistema de Proteção, Controle e Supervisão

O Sistema de Proteção e Controle (SPCS) de uma subestação digital se diferencia das subestações convencionais pelo elevado poder computacional dos IEDs (Dispositivos Eletrônicos Inteligentes). Em vez das manutenções preventivas tradicionais para a aferição dos relés de proteção, adota-se o monitoramento contínuo e o autodiagnóstico dos IEDs, o que elimina a necessidade dessas práticas.

Para esquemas de proteção e controle, deve-se mapear o sinal de qualidade das mensagens e monitorá-las no sistema SCADA. Isso permite o acompanhamento online da integridade da comunicação, priorizando a gestão dos ativos e a manutenção baseada na condição dos equipamentos. Questões sistêmicas que envolvem o Registro de Distúrbios Permanentes (RDP) e Medidores de Fases de Sincronização (PMU) devem ser tratadas de forma a sinalizar imediatamente qualquer falha no equipamento para o operador, possibilitando uma rápida atuação e correção, conforme exemplificado no Capítulo 6 deste fascículo.

Por fim, o plano de manutenção preventiva da planta deve ser implementado de acordo com as recomendações e periodicidades definidas pelos fabricantes, integradas às boas práticas da engenharia de manutenção. Já as rotinas de confiabilidade são essenciais para identificar desvios, tratar as causas da raiz e garantir a disponibilidade contínua da usina.

### 4 - PRÓXIMOS ARTIGOS

O Artigo 8 encerra o fascículo "Digitalização de Subestações e Energias Renováveis". Este artigo abordará os requisitos regulatórios necessários para a obtenção do DAPR-D e fornecerá uma visão detalhada sobre como atender às solicitações do ONS após a RAP do apagão nacional ocorrido em 15/08/2023.

*\*Paulo Alberto Viana Vieira é engenheiro eletricista pela UNIFEI, mestre em Engenharia de Energia pela UNIFEI e possui pós-graduação em Sistemas Fotovoltaicos pela UFV. Ilustrações - Keli Antunes*

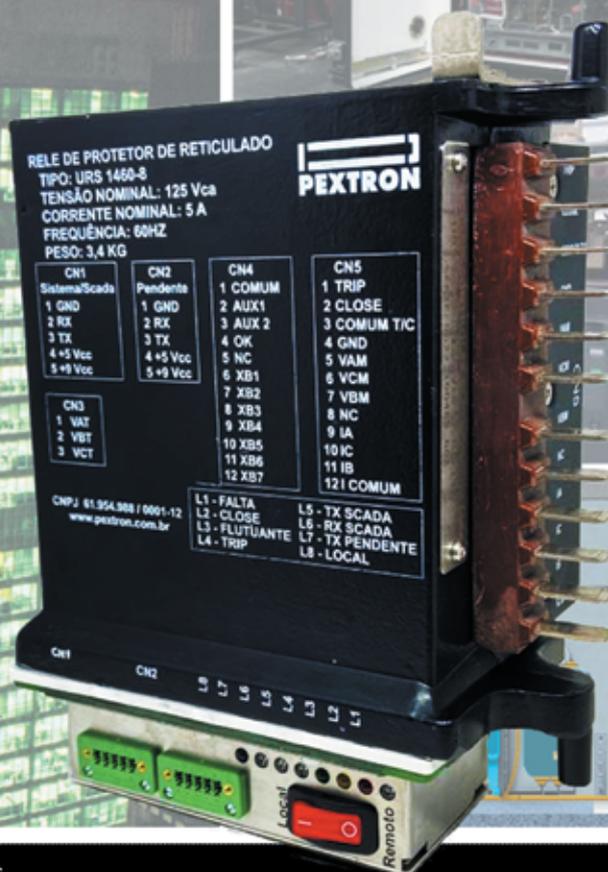
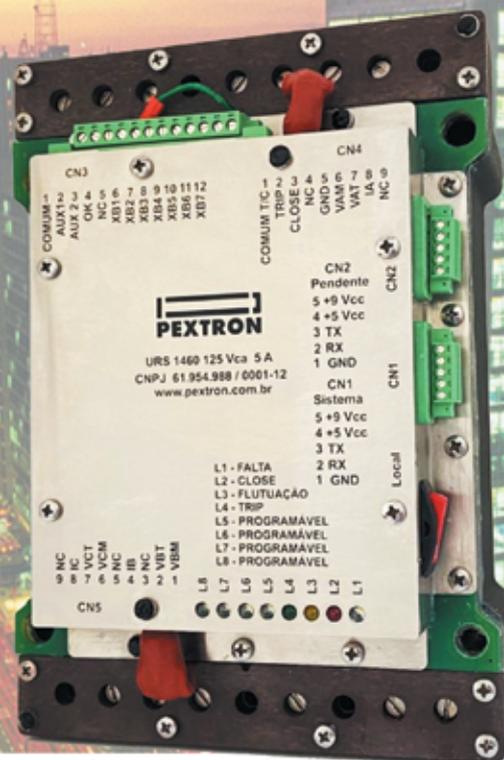


# REDES SUBTERRÂNEAS

RELÉS MULTIFUNÇÃO PARA A PROTEÇÃO DE SISTEMAS NETWORK / SPOT



Produto homologado pela CEMIG, em conjunto com os protetores EATON.



URS 1460-22C  
URS 1460-52C  
URS 1460-MDC

PROTETORES  
EATON /  
WESTINGHOUSE  
CM22 / CM52 / CMD

URS 1460-8  
PROTETOR GE MG8

## SOFTWARE APLICATIVO



PARAMETRIZAÇÃO AMIGAVEL  
LÓGICA PROGRAMÁVEL



COMUNICAÇÃO SERIAL  
MEMÓRIA DE MASSA E REGISTRO DE EVENTOS



MONITORAMENTO  
LEITURA/GRAVAÇÃO DE PENDENTE



Funções ANSI:  
32 / 47 / 59 / 60 / 62 /  
52BF / 62BF / 95

- lógica anti-pumping
- lógica por malha morta
- lógicas programáveis



Av. Miruna, 502 – Moema – São Paulo – SP  
vendas@pextron.com.br – www.pextron.com



VENDAS: +55 (11)  
5094-3200

