

# 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 6

### Uma abordagem sobre o teste de desempenho em usinas fotovoltaicas

Por Paulo Henrique Vieira Soares e \*Alexander Clasen Back

#### 1 - INTRODUÇÃO

O teste de desempenho em usinas fotovoltaicas é essencial para garantir a qualidade e a eficiência operacional, assegurando que todos os componentes, como módulos solares e inversores, funcionem de acordo com as especificações do projeto e as obrigações contratuais. Esses testes são decisivos para a detecção de defeitos que possam afetar a performance da usina, sendo uma condição para a transferência oficial da responsabilidade do projeto da empresa de Engenharia, Suprimentos e Construção (EPC) para o proprietário. Para isso, o teste deve seguir as normas vigentes, incluindo regulamentações internacionais como a IEC 61724 e, no Brasil, a NBR 16274.

#### 2 - CONTEXTUALIZAÇÃO

**PR:** O Performance Ratio (PR) é um indicador chave de desempenho para usinas fotovoltaicas, medindo a proporção entre a energia efetivamente gerada pela usina e a energia que seria gerada em condições ideais, sem perdas do sistema. Este coeficiente reflete a eficiência da planta na conversão da energia solar em elétrica. Importante ressaltar que o PR é específico para cada projeto e não permite comparações diretas com outros projetos ou mesmo comparações temporais dentro do mesmo projeto, visto que pode variar conforme o mês ou as condições climáticas. Uma ilustração do PR como um fator de proporcionalidade pode ser vista na figura 1.



Figura 1: Representação do Performance Ratio de uma usina fotovoltaica

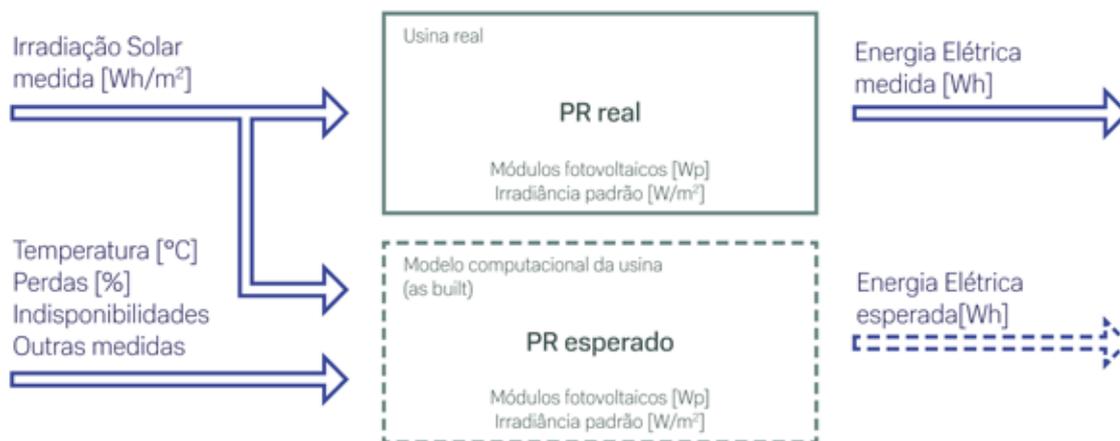


Figura 2: Representação do Energy Performance Index de uma usina fotovoltaica

**EPI:** O Energy Performance Index (EPI) é uma métrica que compara a produção real de energia de uma usina com a produção esperada, baseada em simulações de modelamento computacional do projeto conforme construído ("as built") e ajustada por condições ambientais reais, como irradiação solar e temperatura ambiente. Este índice também considera perdas mensuráveis e indisponibilidades registradas. O EPI é calculado pela razão entre a energia medida e a energia esperada ( $EPI = E_{medida} / E_{esperada}$ ), onde valores iguais ou superiores a 1 indicam um desempenho conforme o esperado, enquanto valores inferiores a 1 sugerem desempenho insuficiente. Por ser uma métrica normalizada, o EPI facilita a compreensão e comunicação entre todas as partes envolvidas no teste, ajudando a prevenir conflitos. A figura 2 ilustra o EPI e as variáveis que são levadas em consideração.

### A importância da certificação

Existem diversas razões para realizar testes de desempenho em usinas fotovoltaicas, destacando-se principalmente a segurança contratual (1) e a eficiência operacional (2):

**1.1 - Garantia de Cumprimento:** Os testes de desempenho asseguram que os parâmetros contratuais, essenciais para a viabilidade econômico-financeira do projeto, estão sendo atendidos. Isso é crucial para evitar disputas legais e financeiras entre a contratada (EPC) e a contratante (proprietária da usina).

**1.2 - Aceitação Final:** O teste é fundamental para a aceitação final do projeto, marcando o ponto em que a responsabilidade pela operação e manutenção da usina é oficialmente transferida para o proprietário, garantindo que o sistema esteja pronto para operar conforme o esperado.

**2.1 - Identificação de Ineficiências:** Os testes ajudam a identificar áreas em que a usina pode não estar operando de forma

otimizada, incluindo problemas com a configuração dos módulos, falhas nos inversores ou nos rastreadores solares.

**2.2 - Otimização Futura:** Os dados coletados durante os testes fornecem informações para futuras otimizações na operação e manutenção da usina, potencialmente melhorando sua eficiência e prolongando sua longevidade.

### Boas práticas para realização do teste

Para assegurar a precisão e confiabilidade dos testes de desempenho, é fundamental aderir a normas e metodologias reconhecidas:

**Normas IEC:** A adoção de normas da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), como a IEC 61724-1, é essencial para padronizar os métodos de medição, análise e comunicação do desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Essas diretrizes fornecem instruções detalhadas sobre como conduzir medições precisas e sua correta interpretação.

**Procedimentos Internos:** É crucial seguir procedimentos operacionais detalhados conforme estabelecido nos documentos internos da empresa. Esses procedimentos devem abranger todas as etapas do teste, desde a preparação e instalação dos equipamentos até a análise de dados e elaboração do relatório final.

**Simulações Energéticas:** O uso de softwares de modelagem energética para realizar simulações baseadas em dados reais coletados é recomendado. Estas simulações ajudam a validar os resultados obtidos e a identificar áreas potenciais de melhoria.

Seguir essas normas e metodologias garante que os testes de desempenho sejam executados de forma consistente e confiável, proporcionando uma avaliação concisa do desempenho da planta fotovoltaica.

### 3 - APLICAÇÃO

A seguir, descreve-se um roteiro mínimo para a realização do teste de desempenho em usinas fotovoltaicas, incluindo os resultados obtidos. Com uma duração estipulada de 30 dias, o teste é projetado para ser aplicado individualmente a cada usina fotovoltaica (UFV) do complexo, com notificações antecipadas de sete dias às partes interessadas.

#### Premissas:

- O período de teste deve ser de 30 dias contínuos, com as partes envolvidas (contratante e BOS - Balance of system) notificadas com pelo menos sete dias de antecedência.
- Cada UFV do complexo é testada individualmente, e os resultados obtidos não podem ser extrapolados para outras usinas.

#### Pré-requisitos:

- A UFV deve estar totalmente operacional e o comissionamento a quente finalizado.
- Uma revisão detalhada da documentação é necessária, juntamente com a limpeza dos módulos fotovoltaicos para garantir condições ideais de teste.

#### Métricas de Desempenho:

- **Dia de Teste:** Definido como o período que começa e termina a cada hora cheia ou a frações de quarto de hora, considerando dias válidos aqueles com irradiação solar superior a  $600 \text{ W/m}^2$  por uma ou mais horas.
- **Dias Perfeitos:** Considerados como tais quando a irradiação é superior a  $600 \text{ W/m}^2$  por quatro ou mais horas consecutivas.
- **Ponto de medição:** A energia é medida no ponto de medição para faturamento, integrada em intervalos de uma hora e expressa em kWh ou MWh.
- **EPI:** O desempenho é avaliado pelo Energy Performance Index, que compara a energia produzida pela usina com a energia esperada sob condições ideais.

Detalhes sobre pré-teste, modelo computacional, manutenções e intervenções, certificados, sistema SCADA, disponibilização dos dados e o relatório final podem ser encontrados no site da UFV (Universidade Federal de Viçosa) sob o título: "Uma avaliação sobre teste de desempenho em usinas fotovoltaicas de grande porte".

#### Exclusão de Dados

Dados podem ser excluídos da análise somente devido à ocorrência de indisponibilidade forçada da rede de transmissão, indisponibilidade programada demandada pelo ONS ou outros eventos de força maior que impeçam a exportação da energia produzida pela usina por motivos que estão além da capacidade de intervenção das equipes de operação e manutenção.

### 3.1 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO

Os resultados a seguir referem-se a uma UFV composta por 8 unidades geradoras, com capacidade total de 39,4 MW. A Tabela 1 apresenta, de forma sequencial, as seguintes informações: dias de coleta dos dados; temperatura média dos módulos fotovoltaicos (em °C); GHI - irradiação global no plano horizontal (em  $\text{Wh/m}^2.\text{dia}$ ); POA - irradiação no plano dos módulos (em  $\text{Wh/m}^2.\text{dia}$ ); dias válidos; dias perfeitos; energia esperada (em kWh) e energia medida (em kWh).

#### 3.1.1 - AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO - DIA 3

O dia de teste 3 é classificado como um dia bom, conforme indicado pela Tabela 1, com uma geração de energia de 327.652 kWh, excedendo a energia esperada de 323.657 kWh. A temperatura ambiente foi registrada em 30 °C, enquanto a temperatura dos módulos alcançou 46,4 °C, abaixo da temperatura esperada de 48 °C. A irradiação no plano dos módulos (POA) medida foi de  $8.870 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$ , superando a irradiação esperada de  $8.492 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$ .

Conforme ilustrado na Figura 3 e descrito na tabela 2, observa-se déficits de geração em relação à energia esperada pelo modelo da UFV, especificamente -2.242 kWh às 7h, -1.203 kWh às 15h e -2.374 kWh às 17h. As perdas de geração no início e no final do dia podem ser atribuídas ao sombreamento dos módulos, geralmente causado por diferenças na altura de montagem dos rastreadores. A análise do Registro de Dados Operacionais (RDO) revela que o déficit matutino entre 7h00 e 7h59 foi causado por uma falha no inversor solar, que demandou rearme no local. Nos eventos da tarde, a falha no sistema de refrigeração do inversor foi identificada como a causa do primeiro déficit entre 15h00 e 15h59, e a mesma causa foi observada para o segundo período, de 17h00 às 17h59, também necessitando de rearme em campo.

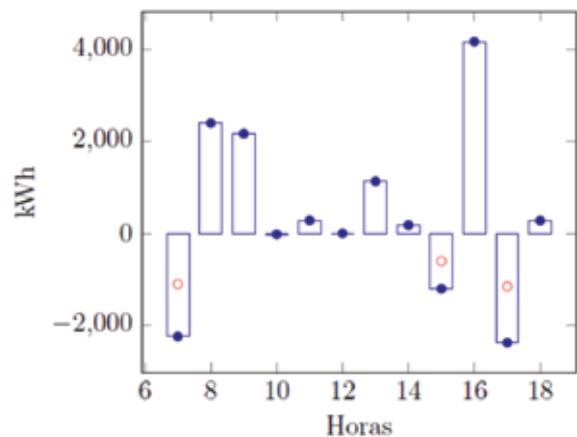


Figura 3 - Desempenho Dia 3 (Energia medida - Esperada)

TABELA 1 - SUMÁRIO DO TESTE DE DESEMPENHO.

Dia	°C	GHI (Wh/m <sup>2</sup> )	POA (Wh/m <sup>2</sup> )	Válido	Perfeito	E. Esp. (kWh)	E. Med. (kWh)
1	48,8	6.426	8.962	SIM	SIM	317.180	311.954
2	44,9	5.572	7.456	SIM	SIM	261.326	259.409
3	46,4	6.712	8.870	SIM	SIM	323.657	327.652
4	47,6	6.653	8.964	SIM	SIM	312.831	306.363
5	49,5	6.772	9.215	SIM	SIM	331.040	333.458
6	50,1	6.870	9.459	SIM	SIM	340.525	320.223
7	48,5	5.811	8.588	SIM	SIM	275.186	277.213
8	38,2	4.313	5.791	SIM	NÃO	199.757	196.941
9	34,2	3.748	4.145	SIM	NÃO	162.307	160.738
10	39,4	4.667	5.406	SIM	SIM	197.495	189.172
11	34,6	4.326	4.777	SIM	SIM	180.721	176.607
12	43,2	5.473	8.336	SIM	SIM	273.886	264.999
13	42,3	5.573	7.631	SIM	SIM	261.538	248.725
14	46,1	5.281	8.112	SIM	NÃO	259.102	263.922
15	48,2	6.230	8.357	SIM	SIM	304.906	304.651
16	47,3	5.567	7.661	SIM	SIM	258.983	268.918
17	46,2	5.938	7.862	SIM	SIM	278.646	266.515
18	42,5	4.775	6.346	SIM	NÃO	210.613	206.292
19	47,5	6.086	8.383	SIM	SIM	300.841	294.396
20	42,1	5.296	6.792	SIM	SIM	242.804	242.274
21	48,2	5.425	8.210	SIM	NÃO	283.859	272.652
22	32,8	2.941	3.607	NÃO	NÃO	130.054	124.792
23	37,7	5.355	7.136	SIM	SIM	258.369	253.781
24	40,9	5.436	7.588	SIM	SIM	263.543	272.113
25	45	6.122	8.347	SIM	SIM	309.225	313.192
26	46,8	5.886	8.304	SIM	SIM	291.899	295.467
27	48,1	5.640	7.705	SIM	SIM	274.168	281.470
28	45,3	5.236	7.502	SIM	SIM	248.519	256.710
29	33,3	2.795	3.918	NÃO	NÃO	134.596	135.595
30	43,5	4.611	6.344	SIM	NÃO	220.075	219.646

FABRICANTE DE CONECTORES DE ALUMÍNIO E COBRE PARA REDE DE DISTRIBUIÇÃO, TRANSMISSÃO E SUBESTAÇÃO

- CONECTOR CUNHA ALUMÍNIO
- CONECTOR CUNHA COBRE
- CONECTOR CUNHA DE ALUMÍNIO COM ESTRIBO
- CONECTOR CUNHA DE COBRE COM ESTRIBO
- CONECTOR DE ATERRAMENTO A COMPRESSÃO TIPO C

- TERMINAL CHAVE FACA TIPO ESPADA 90° E 180°
- TERMINAL BANDEIRA
- TERMINAL BARRA CABO DE COBRE
- TERMINAL BARRA CABO DE ALUMÍNIO
- FERRAMENTA PARA APLICAÇÃO CONECTOR CUNHA

APLICAÇÃO DE CONECTORES E TERMINAIS ORECON EM SUBESTAÇÃO



DESENVOLVEMOS PRODUTOS CONFORME SUA NECESSIDADE

**TABELA 2 - SUMÁRIO DIA 3**

Horário	Temperatura dos módulos	GHI Wh/m <sup>2</sup> .dia médio	Energia Esperada (kWh)	Energia Medida (kWh)
7	20	82	6.344	4102
8	40	275	23.158	25.561
9	51	516	32.708	34.878
10	48	742	36.368	36.350
11	50	885	37.137	37.422
12	52	957	37.109	37.112
13	53	953	36.000	37.135
14	56	878	36.265	36.447
15	57	748	35.670	34.467
16	49	350	17.336	21.511
17	49	282	22.885	20.511
18	32	44	1.877	2.158

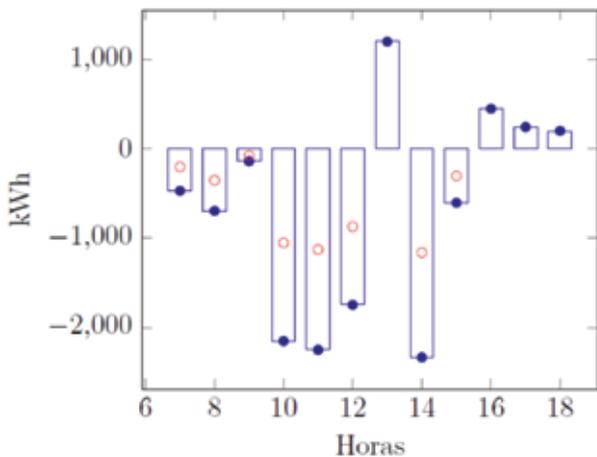
**TABELA 3 - SUMÁRIO DIA 10**

Horário	Temperatura dos módulos	GHI Wh/m <sup>2</sup> .dia médio	Energia Esperada (kWh)	Energia Medida (kWh)
7	22	33	1159	691
8	30	118	4.794	4.101
9	35	279	12.634	12.498
10	45	596	23.949	21.797
11	48	628	26.983	24.733
12	52	895	32.126	30.380
13	50	714	28.784	29.988
14	52	769	32.794	30.460
15	46	476	21.498	20.897
16	31	176	6.262	6.714
17	34	133	5.657	5.904
18	29	30	897	1.100

**3.1.2 - AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO - DIA 10**

O dia de teste 10 é classificado como um dia ruim, uma vez que a energia gerada, segundo a Tabela 1, foi de 189.172 kWh, abaixo da energia esperada de 197.495 kWh. A temperatura ambiente foi registrada em 28 °C, com a temperatura dos módulos alcançando os 39 °C esperados para o dia. A irradiância no plano dos módulos (POA) medida foi de 5.406 Wh/m<sup>2</sup>.dia, superando a irradiância esperada de 4.969 Wh/m<sup>2</sup>.dia.

Conforme indicado na Figura 4 e Tabela 3, o déficit de geração de energia totalizou -5.256 kWh ao longo do dia. Os déficits registrados das 7h00 às 7h59 e das 8h00 às 8h59 sugerem sombreamento nos módulos, geralmente causado por pequenas diferenças na altura de montagem dos rastreadores. Os déficits das 10h00 às 12h59 foram resultado de um desarme do disjuntor que alimenta o circuito eletrônico do sistema de rastreamento solar, fazendo com que os módulos permanecessem na posição de segurança (orientados para o Oeste). Após a substituição do disjuntor, a UFV superou as expectativas do modelo em 1.084 kWh entre 13h00 e 13h59. No entanto, um problema subsequente na rede de comunicação causou novos impactos negativos de -2.334 kWh e -601 kWh nas janelas de 14h00 às 14h59 e 15h00 às 15h59, respectivamente.

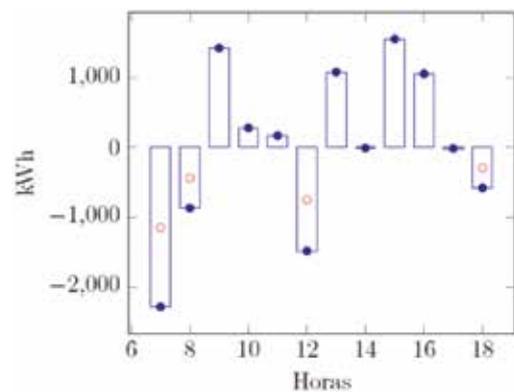


**Figura 4 - Desempenho Dia 10 (Energia medida - Esperada)**

**3.1.3 - AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO - DIA 15**

Já o dia de teste 15 é classificado como um dia de atenção, pois a energia gerada, de acordo com a Tabela 1, foi de 304.651 kWh, levemente abaixo da expectativa de 304.906 kWh. A temperatura ambiente foi registrada em 31 °C, e tanto a temperatura medida quanto a esperada dos módulos foi de 48 °C. A irradiância no plano dos módulos (POA) medida alcançou 8.357 Wh/m<sup>2</sup>.dia, superando a expectativa de 7.967 Wh/m<sup>2</sup>.dia.

Conforme ilustrado na Figura 5 e Tabela 4, observa-se déficits de geração de energia no início e no final do dia, um padrão já anteriormente observado para esta UFV. Notavelmente, houve uma baixa performance entre 12h00 e 12h59, atribuída a uma limitação de potência (derating de Temperatura) pelo inversor solar, uma medida tomada para reduzir a temperatura interna do equipamento.



**Figura 4 - Desempenho Dia 15 (Energia medida - Esperada)**

**TABELA 4 - SUMÁRIO DIA 15**

Horário	Temperatura dos módulos	GHI Wh/m <sup>2</sup> .dia médio	Energia Esperada (kWh)	Energia Medida (kWh)
7	23	67	4.437	2.146
8	35	199	12.886	12.014
9	52	452	27.613	29.042
10	54	690	34.164	34.445
11	53	825	34.868	35.038
12	52	898	35.121	33.633
13	54	836	32.988	34.072
14	56	830	34.928	34.920
15	58	653	32.644	34.203
16	57	474	30.804	31.864
17	50	248	20.202	20.188
18	33	58	3.670	3.087

A **confiança** de sempre,  
a certeza do **futuro**.



✓ **HOMOLOGADA NAS PRINCIPAIS**  
CONCESSIONÁRIAS DE ENERGIA

✓ **LINHA DE PRODUÇÃO**  
ESCALÁVEL E FLEXÍVEL

✓ **MATÉRIA-PRIMA**  
DE ALTA QUALIDADE



[neocable.com.br](http://neocable.com.br)



### 3.2 - RESULTADO DO TESTE DE DESEMPENHO

O desempenho diário ao longo dos 30 dias de avaliação é apresentado na Figura 6 para um EPI de 1,02 %, levando em conta as incertezas associadas ao modelo (2,7%) e ao medidor de energia (0,1%). Para a aprovação da usina, é necessário que o somatório das barras na parte superior do gráfico seja maior ou igual ao somatório das barras inferiores.

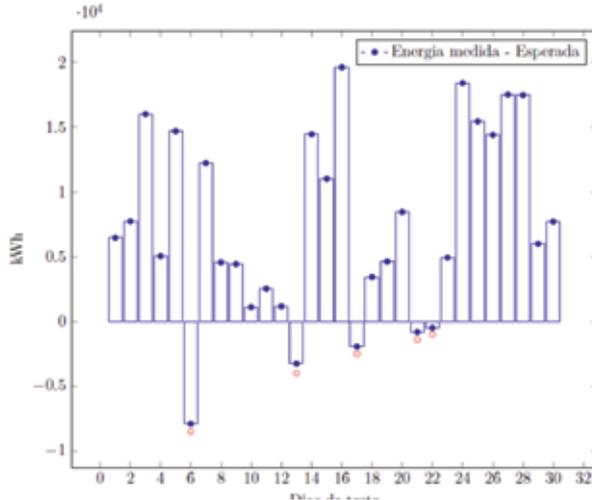


Figura 6 – Desempenho no período

No histograma apresentado na Figura 7, observam-se 10 dias em que a geração de energia variou entre 244 kWh e 273 kWh, seguidos por 7 dias com valores entre 303 kWh e 333 kWh, todos localizados à direita do gráfico. Normalmente, a energia gerada é uma função diretamente correlacionada com a irradiância acumulada do dia. Conforme evidenciado na Tabela 1, a geração só ultrapassa os 300 kWh quando o GHI excede 6.000 Wh/m<sup>2</sup>.dia.

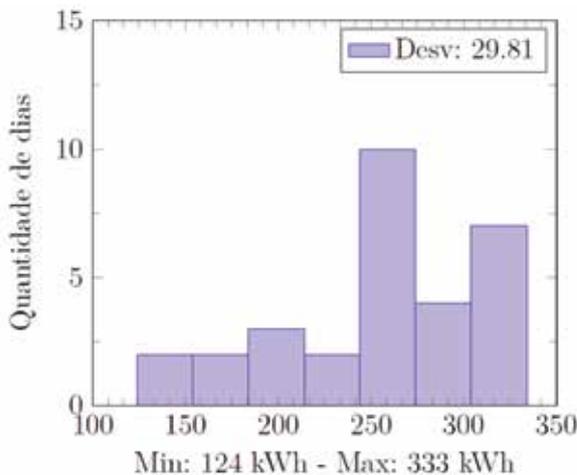


Figura 7 – Histograma de Energia Gerada em kWh



Por fim, a Figura 8 ilustra a relação entre a energia gerada (eixo y, em kWh) e a irradiância (eixo x, em Wh/m<sup>2</sup>.dia). Para este caso específico, observa-se que a energia gerada em condições normais pode ser representada por uma função linear de primeiro grau ( $y=47.53*x$ ). Isso indica uma correlação forte entre a energia medida e a irradiância GHI, com um coeficiente de correlação  $R^2$  superior a 0,99. Em termos práticos, para essa UFV durante os 30 dias de avaliação de desempenho, cada 1.000 Wh/m<sup>2</sup> de irradiância diária resulta na geração de 47,53 kWh, ou 0,475 MWh.

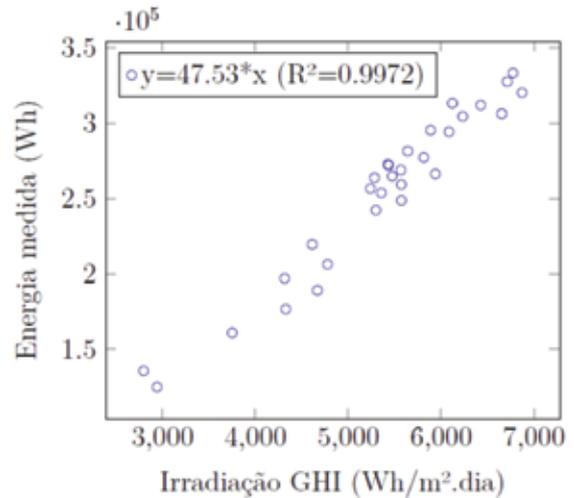


Figura 8 – Energia medida versus Irradiância

### 4.0 - PRÓXIMOS ARTIGOS

O Artigo 7 abordará os desafios para operação e manutenção (O&M) de grandes usinas fotovoltaicas, explorando principalmente a análise da eficiência de inversores fotovoltaicos através da curva de potência.

\*Alexander Clasen Back - Engenheiro eletricitista formado pela UFSC (Florianópolis, 2006) e UNIFEI (Itajubá, 2010). Especialista em Energias Renováveis com 15 anos de experiência no desenvolvimento de projetos hidroelétricos, eólicos e solares de grande porte, junto a importantes players do setor. Coautor de seis Atlas eólicos e solares (BA, RS, PB e CE). Trabalha atualmente na Qair Brasil, onde desenvolve projetos eólicos, solares, BESS e H2/HN3.

Imagens - Keli Antunes



+20 ANOS

INOVANDO EM CONEXÕES ELÉTRICAS

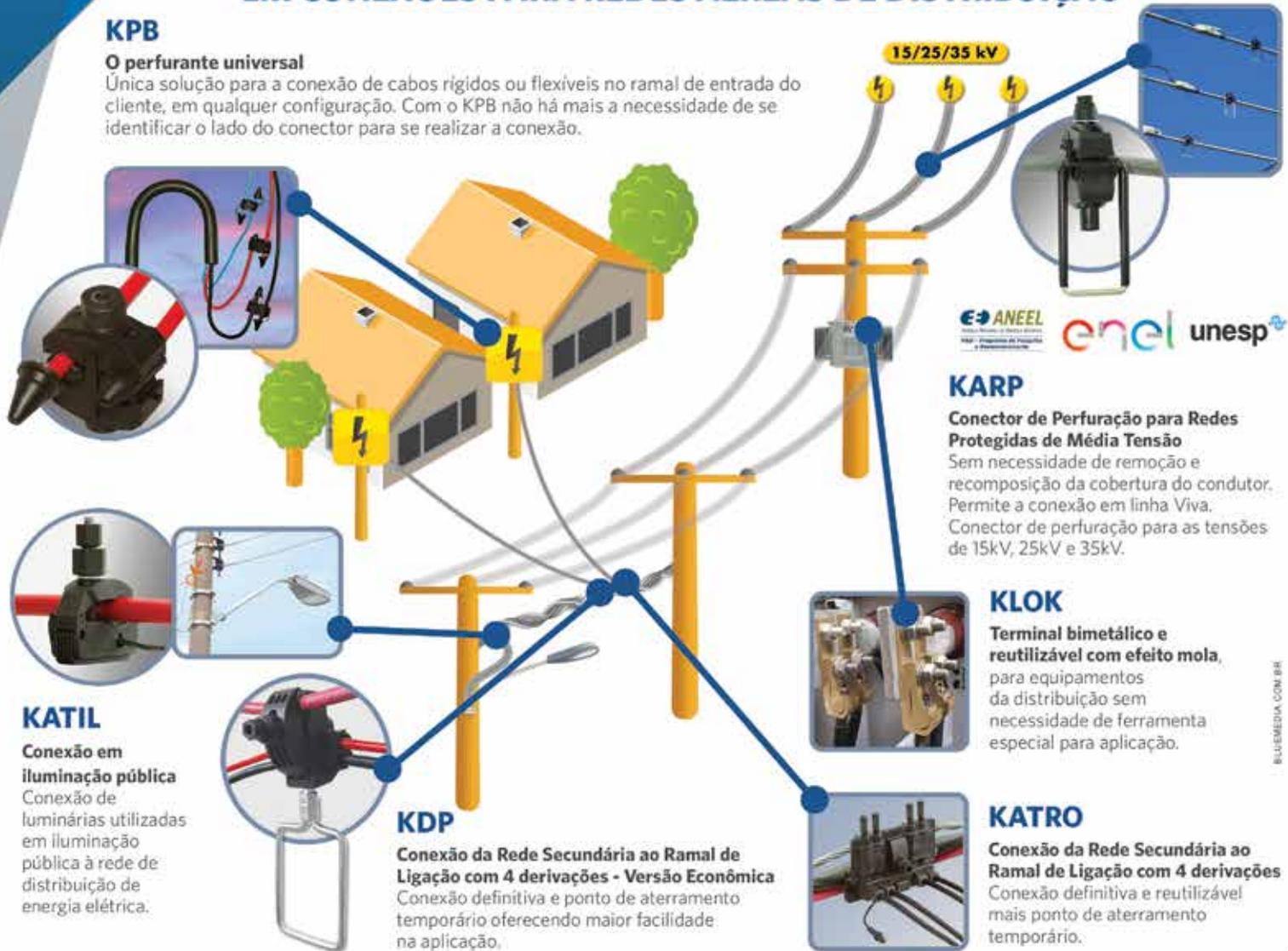


# A SOLUÇÃO COMPLETA EM CONEXÕES PARA REDES AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO

## KPB

### O perfurante universal

Única solução para a conexão de cabos rígidos ou flexíveis no ramal de entrada do cliente, em qualquer configuração. Com o KPB não há mais a necessidade de se identificar o lado do conector para se realizar a conexão.



15/25/35 kV



## KARP

### Conector de Perfuração para Redes Protegidas de Média Tensão

Sem necessidade de remoção e reposição da cobertura do condutor. Permite a conexão em linha Viva. Conector de perfuração para as tensões de 15kV, 25kV e 35kV.

## KLOK

Terminal bimetalico e reutilizável com efeito mola, para equipamentos da distribuição sem necessidade de ferramenta especial para aplicação.

## KATIL

Conexão em iluminação pública  
Conexão de luminárias utilizadas em iluminação pública à rede de distribuição de energia elétrica.

## KDP

Conexão da Rede Secundária ao Ramal de Ligação com 4 derivações - Versão Econômica  
Conexão definitiva e ponto de aterramento temporário oferecendo maior facilidade na aplicação.

## KATRO

Conexão da Rede Secundária ao Ramal de Ligação com 4 derivações  
Conexão definitiva e reutilizável mais ponto de aterramento temporário.



KRJ Ind. e Com. Ltda.  
Rua Guaraniésia, 811/815 - Vila Maria - CEP 02112-001  
São Paulo, SP - Brasil | Tel.: +55 (11) 2971-2300



KRJ.COM.BR

BLUEMEDIA.COM.BR