Estudo de Viabilidade do Uso de Energia Solar em Trens de Passageiro

José Luiz Borba *

* VALE S.A. - *Capacitação e Inovação*

Av. Dante Micheline, 5500, CEP: 29090-900 - Vitória - Espírito Santo

* UFES – *Departamento de Engenharia Elétrica*

Av. Fernando Ferrari, 514, CEP: 29075-910 - Vitória - Espírito Santo

e-mail: jose.borba@vale.com

Resumo

As tecnologias voltadas à sustentabilidade e minimização dos impactos ao meio ambiente hoje são escopo dos grandes projetos de geração de energia elétrica.
Pensando no futuro, os projetos hoje focam em alternativas de energias renováveis não poluentes como premissas de implementação.
Este trabalho tem como objetivo expor o uso da energia fotovoltaica como fonte renovável e capaz de atender à uma demanda energética hoje alimentada por uma fonte de geração movida à combustível fóssil.
Através do detalhamento dos componentes necessários e alternativas de implementação para as cargas proposta, visa atender de forma parcial ou completa um sistema de alimentação de um trem de passageiros, reduzindo seus impactos ao meio ambiente.

Palavras-Chave: Trem de Passageiro, Energia Renovável, Energia Fotovoltaica.

1 Introdução

O foco dos estudos para obtenção de fontes de energia alternativa ganha cada vez mais incentivo e subsídios, para que se possa garantir um futuro com suprimento para atendimento da crescente demanda.
Entre as formas mais proeminentes em termos de ganhos frente às suas limitações e efeitos residuais podemos citar a geração de energia por meio da conversão de luz solar em energia elétrica.
Fenômeno observado e explicado por Albert Einstein em 1905, o efeito fotoelétrico foi a fundamentação para o desenvolvimento da indústria hoje existente de materiais que convertem a energia solar em eletricidade.
Em 1954 a Bell Labs foi responsável pelo desenvolvimento da primeira célula fotovoltaica de silício, com eficiência em

torno de 6%; atualmente o percentual alcançado com o desenvolvimento da tecnologia se encontra na faixa de 20%.

É possível destacar como pontos positivos para esta forma de geração: Energia inesgotável, baixo custo de manutenção e geração sem resíduos e poluição.

Como pontos negativos, o alto custo de implantação estabelece a falta de interesse na tecnologia: menos de 2% do percentual de geração no Brasil.

Poucas são as apostas neste tipo de fonte.

Em contrapartida, nosso país possui um grande potencial para este fim, devido ao seu posicionamento intertropical, que lhe garante uma alta incidência de insolação durante todo o ano.

Os sistemas solares possuem alta flexibilidade quanto à sua implementação, tornando possível criar configurações acopladas à rede elétrica convencional ou qualquer outra fonte, assim como de forma independente no formato “off-grid”, como fonte primária e única de energia.

A atual demanda e projeção futura do consumo de energia elétrica, assim como o respeito à integridade e preocupação com o futuro do meio ambiente exigem que novas formas de energia tenham cada vez mais incentivo de desenvolvimento, assim como estudos para sua implementação de forma sustentável.

2 Sistemas fotovoltaicos para trens de passageiros

A energia demandada pelas cargas nos vagões de um trem de passageiro é produzida por um gerador primário, formado por um grupo motor-gerador a diesel e uma rede trifásica de distribuição.

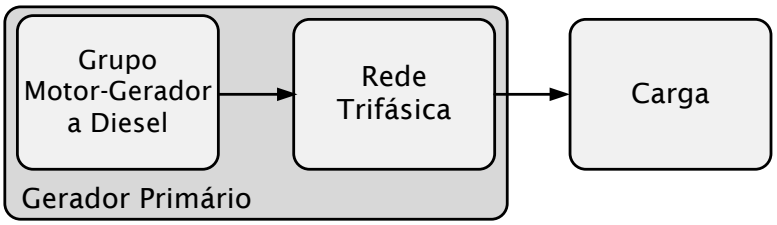

Figura 1 – Alimentação dos trens de passageiro com gerador primário

Além do gerador primário de energia já existente, podemos ter um gerador solar de energia, que nos intervalos de constante geração solar, um gerenciador de energia define esta fonte como principal, direcionando sua energia à carga através de um inversor.

Nos momentos de tempo nublado ou horários sem incidência solar, o gerenciador de energia recorre ao gerador primário para alimentação da carga.

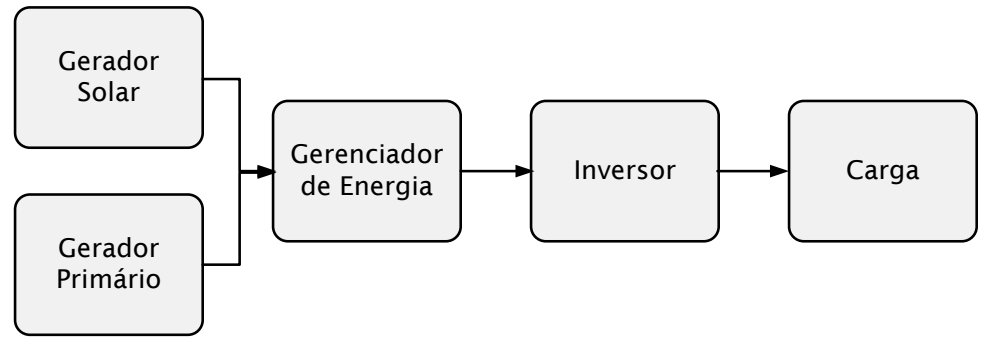

Figura 2 - Alimentação dos trens de passageiro com gerador solar

Sistemas isolados da rede primária utilizam-se de formas de armazenamento de energia para entrega da energia nos intervalos de não geração.

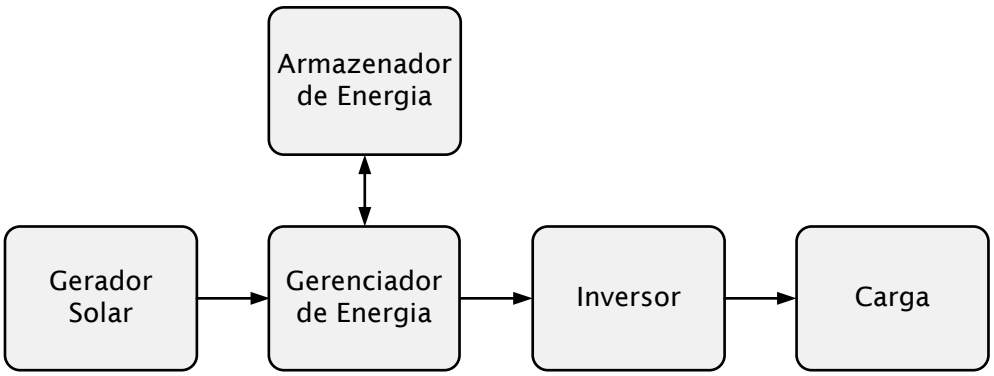

Figura 3 - Alimentação dos trens de passageiros com armazenamento de energia

Durante toda a janela de tempo produtiva, o gerador solar alimenta a carga, e toda energia excedente alimenta, por exemplo, bancos de bateria, que suprem a demanda energética no restante do tempo.

Sistemas híbridos unem as duas formas de aplicação e possuem conexão ao gerador primário, ao gerador solar e a um armazenador de energia.

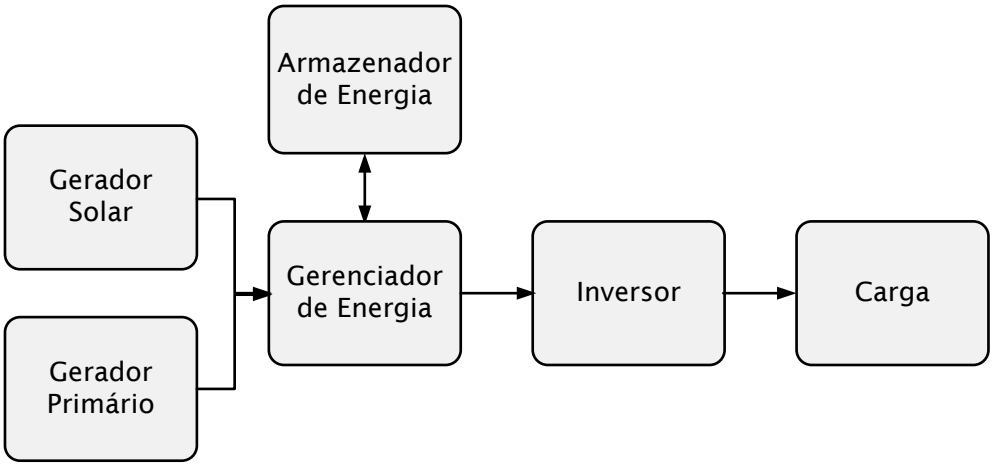

Figura 4 - Alimentação dos trens de passageiros com sistema híbrido

O gerenciador de energia monitora os níveis de geração e fornecimento de energia das três fontes a ele acopladas, fazendo com que o gerador primário seja utilizado apenas nos momentos em que não há produção por parte do gerador solar ou quando armazenador de energia se esgota, evitando sobrecargas, descargas rápidas e/ou profundas e outros fenômenos que reduzem a vida útil do armazenador de energia.

Isso, é essencial para o armazenador de energia, que possui especificações de recarga e descarga que devem ser seguidas para garantir sua vida útil.

O inversor é importante para a adequação da energia gerada em termos de corrente e tensão a ser entregue à carga instalada.

2.1 Célula fotovoltaica

A dopagem do silício com outros elementos gera materiais semicondutores de diferentes tipos.

Um semicondutor de silício do tipo N possui elétrons livres, enquanto que o do tipo P possui lacunas livres (ausência de elétrons).

O componente primário de um sistema de geração solar é a célula fotovoltaica, que é composta por uma junção formada pelos dois materiais.

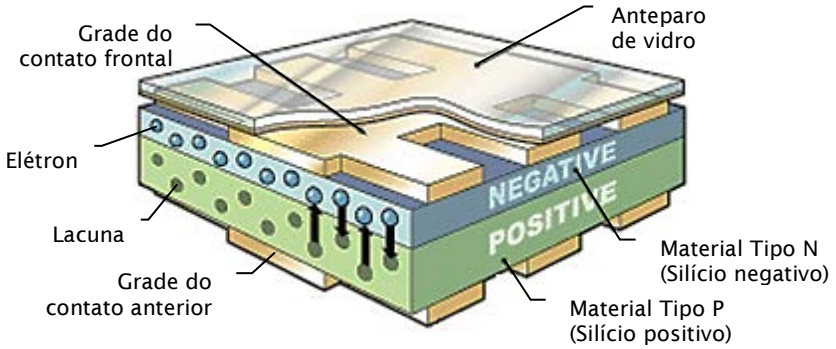

Figura 5 - Composição da célula fotovoltaica

Quando da incidência dos raios solares (fótons) sobre uma célula fotovoltaica, uma parcela da energia é absorvida pela junção, que é utilizada para liberar elétrons da camada do tipo N, resultando numa corrente elétrica.

A conexão de várias células forma um módulo, comumente chamado de painel solar.

O percentual de transformação dos fótons em elétrons de um painel solar é traduzido como a eficiência do painel solar, e pode ser calculado através da seguinte fórmula:

$$\boldsymbol{n}(\%) = \frac{\boldsymbol{P_m}}{\boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{A_c}}$$

$\boldsymbol{P_m}$ ⇨ Potência máxima $[W]$

$\boldsymbol{E}$ ⇨ Incidência de irradiação $[W/m^2]$

$\boldsymbol{A_c}$ ⇨ Área de superfície de contato de incidência solar

2.2 Painéis solares

Os três tipos de painéis solares que se sobressaem quanto aos atributos necessários para uma boa conversão da energia proveniente do sol em energia

elétrica e utilização do espaço disponível ao equipamento de aplicação, são:

- **Células de silício monocristalino**

Painéis de silício monocristalino são células provenientes de um único cristal, de estrutura simétrica em sua composição, e dotadas de características que são resultado do alto grau de pureza do silício.

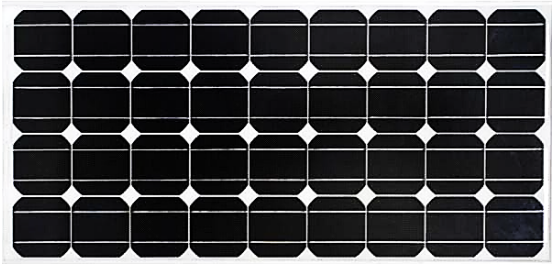

Figura 6 - Painel com células de silício monocristalino

Possuem alta absorção solar e as melhores taxas de conversão, traduzidas em eficiência, variando entre 15% a 20%, ou seja, o melhor que se pode obter da tecnologia de painéis solares.

O reflexo para o projeto é direto no que diz respeito à área necessária e potência obtida.

Sua construção é sempre rígida, sobre estruturas metálicas para suporte das células.

- **Células silício policristalino**

Painéis de silício policristalino não possuem o mesmo arranjo em sua estrutura cristalina, resultado de um processo menos minucioso no que diz respeito à manufatura da célula.

Como resultado, sua eficiência, durabilidade, entre outros fatores, é reduzida em relação às células de silício monocristalino.

Sua eficiência varia entre 13 a 16%, o que corresponde, entretanto a um percentual muito bom de conversão de energia.

Quando comparado à primeira tecnologia, necessita de maior espaço para geração de mesma potência.

Similarmente ao de silício monocristalino, esta célula apresenta rigidez na sua composição, sendo necessária também uma estrutura rígida para utilização e proteção.

Figura 7 - Painéis com células de silício policristalino de uso residencial

- **Células de silício amorfo**

Os painéis de silício amorfo são uma combinação de outros substratos (vidro, aço

inox ou até mesmo plástico) com uma proporção muito pequena de silício.

O processo resulta em um painel com baixa eficiência, em faixas de 6% a 9%.

A aplicação utilizando um simples painel possui eficiência baixa, mas é possível utilizar o agrupamento de várias células, sobrepostas, para aumentar sua eficiência.

Para a configuração denominada "triple stacking", ou empilhamento triplo, permite a obtenção de 10% de eficiência, o que excede os padrões da tecnologia de painéis amorfos.

Este tipo de painel possui uma particularidade exclusiva associada à sua estrutura, que lhe permite ser instalado em curva, ou seja, é flexível, e capaz das mais diversas aplicações.

Figura 8 - Capacidade de flexão de um painel de silício amorfo

É importante ressaltar que os painéis solares variam seus parâmetros de acordo com a temperatura e a incidência solar.

2.3 Baterias

A aplicação demanda por baterias que:

- Não podem sofrer sobrecarga, o que pode levar a vazamentos;
- Não podem ser descarregadas além de um percentual da sua tensão, sob o risco de diminuição da sua vida útil;
- Sejam capazes de descarregar durante ciclos longos e com corrente constante, baterias de ciclo profundo;
- Sejam capazes de vários ciclos de carregamento e descarregamento.

Para atender a estes requisitos, existem duas tecnologias mais usuais para aplicação de energia solar:

- Baterias Chumbo-ácidas

  As baterias chumbo-ácidas dividem-se em:

- Baterias ventiladas, em que há a necessidade de adição de água durante a vida útil para controle dos eletrólitos líquidos;
- Baterias ventiladas com gel, em que o gel substitui a adição de água;
- Baterias AGM, em que uma capa de vidro é utilizada para conter o eletrólito.

Para aplicações em sistemas solares, as baterias chumbo-ácidas são as mais usuais

por ser de manutenção simples e de longa vida útil.

Apesar das baterias ventiladas serem evitadas, pois geram uma grande quantidade de gases na sua reação química de geração de energia, este tipo de bateria é amplamente utilizado nas ferrovias, por serem acondicionadas em compartimentos isolados especiais, e ter uma rotina de manutenção bastante simples.

- Níquel-Cádmio (Ni-Cd)

  As baterias níquel-cádmio possuem características que se adequam aos sistemas solares de geração de energia.
  Possuem manutenção zero, longa vida útil e são capazes de grandes quantidades de armazenamento de energia.
  Entretanto, requerem cuidados especiais para carregamento por conta do efeito memória, que pode danificar a capacidade de carregamento da bateria e diminuir sua vida útil.
  A criticidade da bateria Ni-Cd é o seu descarte; por ser composta de elementos (níquel e cádmio) caracterizados como pesados e altamente nocivos ao meio ambiente.

2.4 Inversores

Enquanto a maioria dos equipamentos que compõem a demanda de carga de um trem de passageiros é de corrente alternada, os painéis solares geram corrente contínua no seu processo.
Os inversores são os elementos que realizam a conversão da corrente contínua em alternada na frequência desejada de operação, para atender a demanda da carga.
Importante é que a capacidade de potência do inversor seja capaz de suportar a carga demandada, além de possuir perdas internas de inversão que não impactem o sistema como um todo.
As tecnologias mais usualmente encontradas no mercado são do formato:

- **PWM** (**P**ulse **W**idth **M**odulator) - Modulador de Largura de Pulso
  Trabalha variando a largura do pulso no tempo, de forma que a tensão de saída, proporcionalmente ao tempo do pulso no valor de tensão nominal, é determinada;
- **MPPT** (**M**aximum **P**ower **P**oint **T**racking) - Acompanhamento do Ponto de Potência Máxima
  Trabalha rastreando os valores de entrada para gerar uma saída pré configurada.

A principal diferença das tecnologias é o percentual de eficiência de conversão; os controladores PWM alteram a tensão de entrada de acordo com a necessidade de saída, mas mantendo a corrente constante.
Desta forma, há perda de potência na conversão.
No caso do MPPT, ambos os parâmetros são alterados de acordo com a necessidade, garantindo maior eficiência na transformação.
Importante ressaltar que os painéis solares variam seus parâmetros de acordo com temperatura e incidência solar; desta forma o controlador de carga, no caso do MPPT pode

ser configurado a reagir a estas alterações e garantir a alimentação correta do sistema.

2.5 Gerenciador de energia

O gerenciador de energia é o dispositivo que, através do mapeamento da alimentação recebida em seus terminais de entrada, configuram os parâmetros de saída de acordo com uma ou especificação prévia, para garantir parâmetros ideais de funcionamento do sistema.

3 O trem de passageiros da EFVM

O trem de passageiros da Estrada de Ferro Vitória a Minas - EFVM da Vale é uma unidade de transporte de pessoas, com a seguinte configuração máxima, que totaliza 30 unidades:

1 - Locomotiva, responsável pela força motriz;
1 - Vagão gerador, do tipo diesel elétrico, responsável pela alimentação primária do sistema;
4 - Vagões classe executiva para passageiros;
1 - Vagão especial;
1 - Vagão para armazenamento de bagagens;
1 - Vagão lanchonete;
1 - Vagão restaurante;
7 - Vagões classe econômica para acomodação de passageiros;
1 - Vagão lanchonete;
12 - Vagões classe econômica para acomodação de passageiros;
1 - Vagão gerador, do tipo diesel elétrico, responsável pela alimentação primária do sistema.

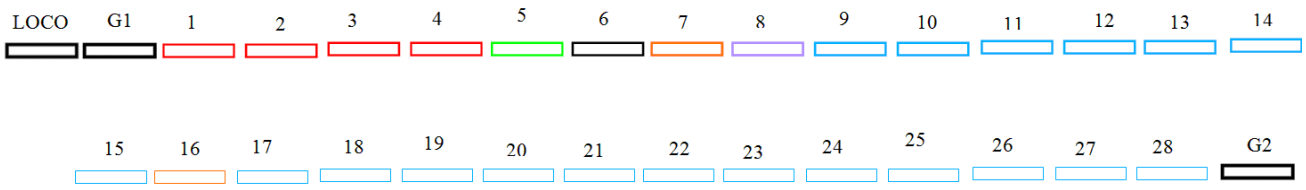

Figura 9 - Esquemático funcional das unidades que compõem o trem

O trem de passageiros da Estrada de Ferro Vitória a Minas - EFVM percorre diariamente o trajeto de 664 km, localizado na região sudeste do Brasil, entre Vitória - ES e Belo Horizonte - MG, e vice-versa.

Figura 10 - Trajeto do trem de passageiros da EFVM

Partindo originalmente às 7:30 h da manhã da estação Pedro Nolasco, localizada em Cariacica, região metropolitana de Vitória, o trem percorre o interior dos estados do Espírito Santo e de Minas gerais, passando por cidades como João Neiva - ES, Governador Valadares - MG, Ipatinga - MG, chegando finalmente a estação Central de Belo Horizonte - MG às 20:10 h.

No sentido inverso, o trem parte Belo Horizonte às 7:30 h, chegando a Vitória às 20:30.

3.1 Tempo de insolação

O trecho percorrido conta com um elevado potencial de insolação, que pode ser bem utilizado baseado no fato de que o trem opera em sua maior parte do tempo sob incidência solar.

Através dos mapas solarimétricos do ATLAS Brasileiro de Energia Solar é possível determinar a quantidade de horas de insolação diária na região considerada.

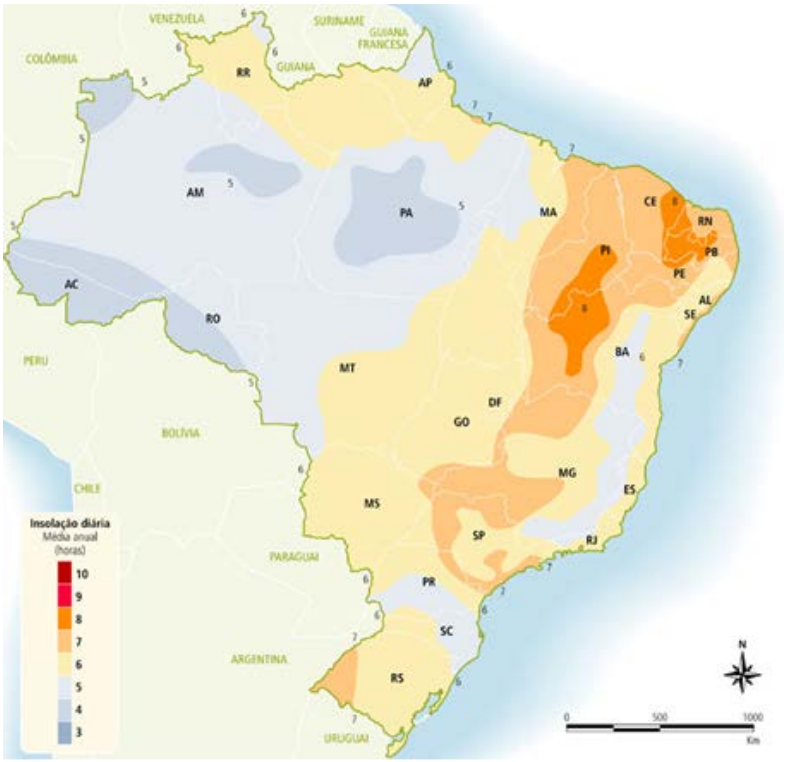

Figura 11 - Média anual de insolação diária no Brasil

De acordo com o mapa da Figura 12, situamos o trajeto do trem nas duas áreas correspondentes a 5 e 6 horas de média solar por dia.

Desta forma se torna conveniente tomar como base a média diária de 5 h, visto que o percurso apresenta sua maior parte, cerca de 80 % ou 531 km, nesta região.

Através do mapa da Figura 12 é possível determinar a quantidade de energia solar incidente na região em que o percurso do trem de passageiros está inserido.

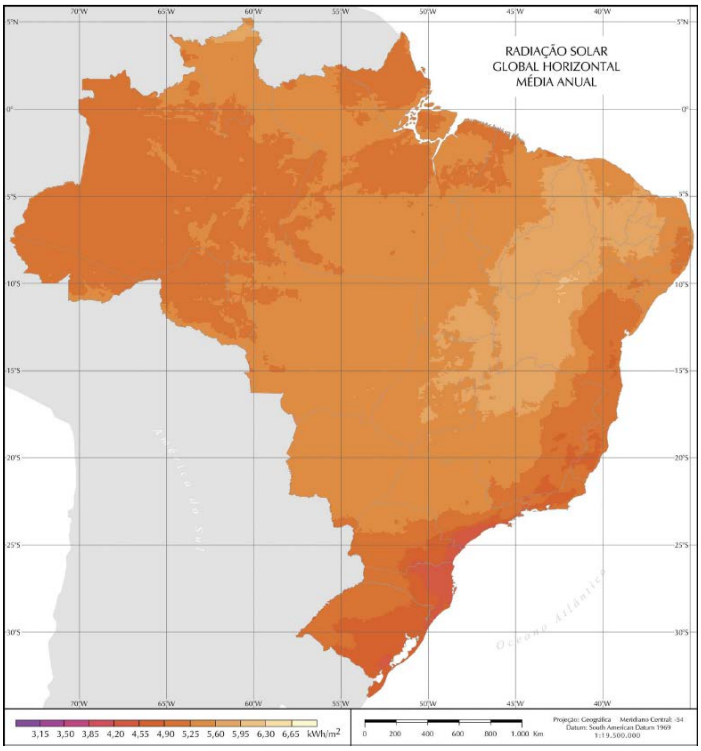

Figura 12 - Média anual da radiação solar global no território brasileiro

Analisando o mapa da Figura 12 é possível notar que, na região em que o trem realiza suas operações, temos cerca de 4,90 a 5,25 kWh/m^2 de média de radiação solar durante o ano.

No mapa da Figura 13 estão descritas as regiões brasileiras e as quatro estações do ano com suas respectivas incidências solares.

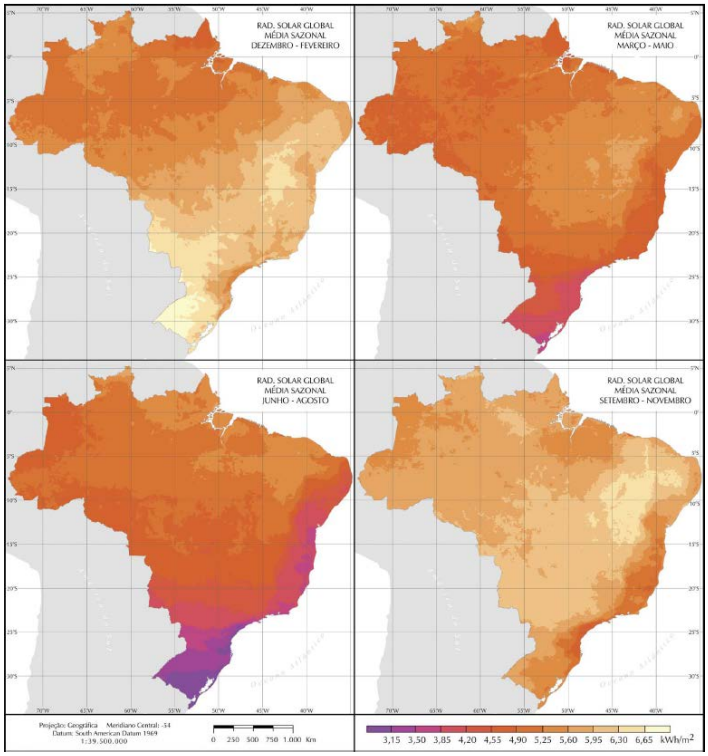

Figura 13 - Médias sazonais da irradiação global diária por estação do ano

Pela a análise dos mapas da Figura 13, vemos que um cenário crítico, com a menor incidência solar possível durante o ano, ocorre de julho a agosto, com um valor de 3,85 a 4,20 kWh/m^2.

Com relação à temperatura, segundo o Clima Tempo, a região encontra-se na faixa de temperatura média de 21 a 26 ºC.

Comparando estes valores com o padrão de potência de painéis solares frente a insolação estabelecida pelas Condições de Teste Padrão - **S**tandard **T**est **C**onditions, estabelecido em 1 kWh/m^2 de incidência, para 25 ºC de temperatura, vemos que se obtém valores bem superiores no que diz respeito à insolação.

3.2 Especificação do painel e arranjo necessário

Os módulos serão determinados por sua eficiência de conversão, relacionada com as necessidades operacionais, ou seja, tempo de exposição necessário, temperaturas de operação, estrutura de montagem e angulação necessária para obtenção dos resultados compatíveis com a carga.

A escolha dos modelos a serem analisados parte do princípio inicial da eficiência.

Os painéis de silício monocristalino e policristalinos, por possuírem capacidades similares, no que diz respeito à sua eficiência, serão a primeira análise.

Ambos possuem suas faixas operacionais de eficiência na casa dos 12 a 28 %, assim como características operacionais semelhantes.

Desta forma, teremos apenas duas comparações, com relação às três tecnologias apresentadas; painéis de silício, englobando as duas tecnologias e painéis de silício amórfico hidrogenado.

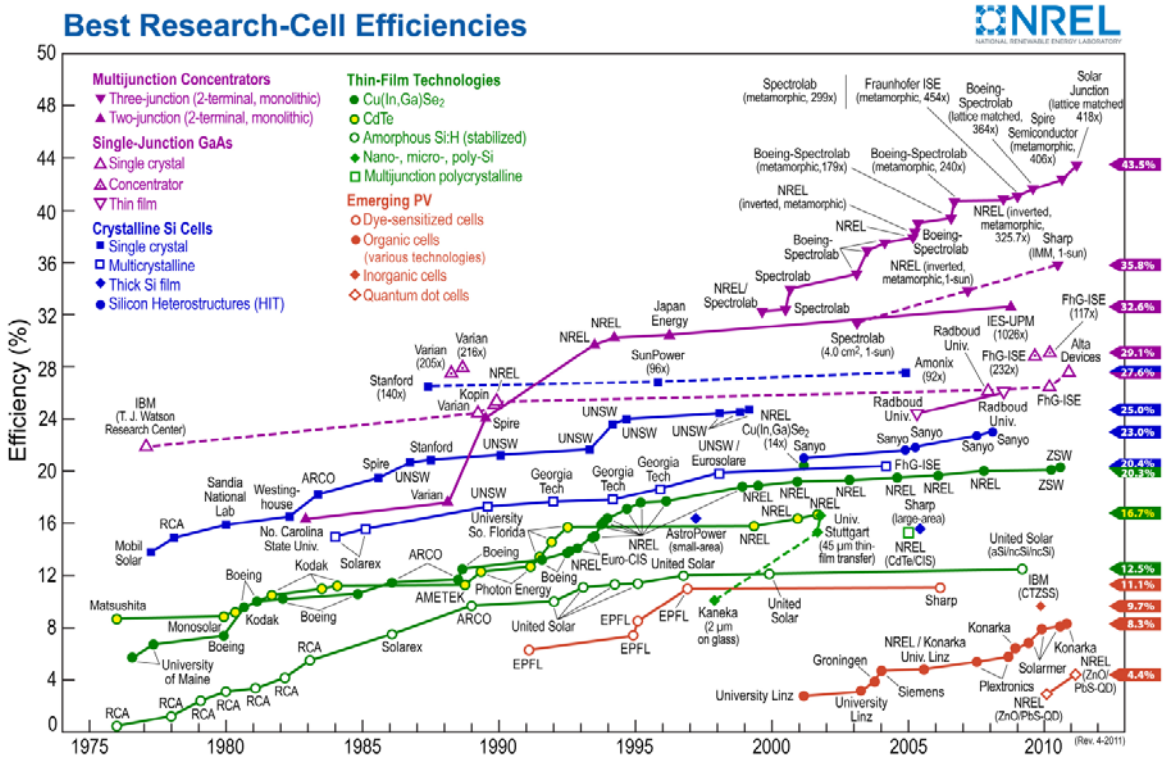

Figura 14 - Evolução das tecnologias de células solares e suas eficiências

Dentro da gama dos painéis com maior eficiência, os monocristalinos são superiores aos de silício amorfos e similares aos policristalinos.

Entretanto, algumas características são importantes para a conclusão sobre o painel, como se segue:

- **Temperatura**: entre as duas tecnologias, policristalina e monocristalina, a primeira possui um coeficiente térmico inferior, ou seja, apresenta menor variação da potência, P_{max}, gerada por aumento percentual da temperatura;
- **Efeito de penumbra**: os painéis monocristalinos têm sua eficiência reduzida drasticamente em situações de penumbra, mesmo que parciais, com relação aos painéis policristalinos.

Conclui-se então que devemos utilizar o modelo policristalino, que se adequa melhor às situações apresentadas no projeto, no que diz respeito à temperaturas e comportamento em ausência parcial de insolação.

Na Tabela 1 são mostradas as especificações do modelo KD245GH-4FB do fabricante Kyocera, proposto como referência no projeto.

Tabela 1 - Painel Kyocera KD-245GH-4FB

ELECTRICAL PERFORMANCE

At 1000 W/m² (STC)*		
Maximum Power	245	W
Maximum Power Voltage (V_{mp})	29.8	V
Maximum Power Current (I_{mp})	8.23	A
Open Circuit Voltage (V_{oc})	36.9	A
Short Circuit Current (I_{sc})	8.91	A
Efficiency	14.8	%

At 800 W/m² (NOCT)**		
Maximum Power	176	W
Maximum Power Voltage (V_{mp})	26.8	V
Maximum Power Current (I_{mp})	6.58	A
Open Circuit Voltage (V_{oc})	33.7	A
Short Circuit Current (I_{sc})	7.21	A
NOCT	45	°C

Other Electrical Characteristics		
Power Tolerance	+5/-3	%
Maximum System Voltage	1000	V
Maximum Reverse Current	15	A
Series Fuse Rating	15	A
Temperature Coefficient of (V_{oc})	-0.36	%/C
Temperature Coefficient of (I_{sc})	0.06	%/C
Temperature Coefficient of Max. Power	-0.46	%/C

MODULE CHARACTERISTICS

Dimensions		
Length	1662 (±2.5)	mm
Width	990 (±2.5)	mm
Depth (Including Junction Box)	46	mm
Weight	21	kg
Cable	(+)1190 / (-)960	mm
Connection Type	PV-03 (SMK)	
Junction Box	113 x 82 x 15	mm
Number of Bypass Diodes	3	
IP Code	IP65	

Cells		
Cell Per Module	60	
Cell Technology	multi-crystalline	
Cell Dimensions (Square)	156 x 156	mm
Cell Bonding	3 busbar	

* Electrical values under standard test conditions (STC) – irradiation of 1000 W/M², airmass AM 1.5, and cell temperature of 25°C.

** Electrical values under normal operating test conditions (NOCT) – irradiation of 800 W/M², airmass AM 1.5, wind speed of 1m/s, and ambient temperature of 20°C.

KYOCERA reserves the right to modify these specifications without notice.

A análise do espaço disponível no teto do vagão é importante para a determinação do número de painéis que podem ser instalados.

Partindo da vista em corte mostrada na Figura 15, vemos que o teto do vagão possui

um formato abaulado, composto por duas faces.

Por sua vez, cada face é composta de duas seções retas, que são conectadas formando um ângulo.

A vista superior do teto do trem mostrada na Figura 15, traz o perfil da área útil a ser utilizada.

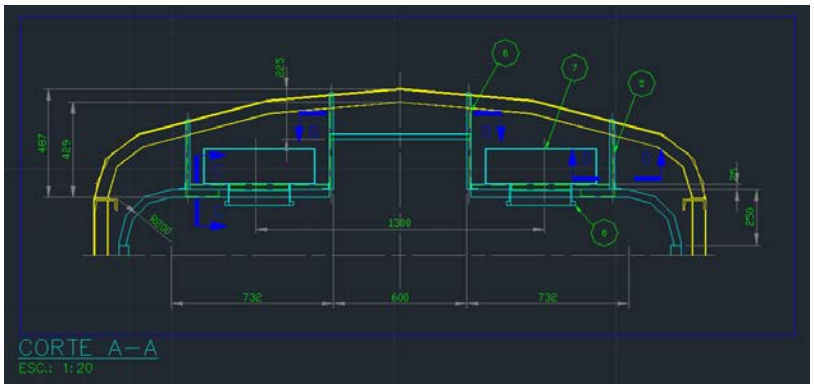

Figura 15 - Vista em corte do teto do vagão.

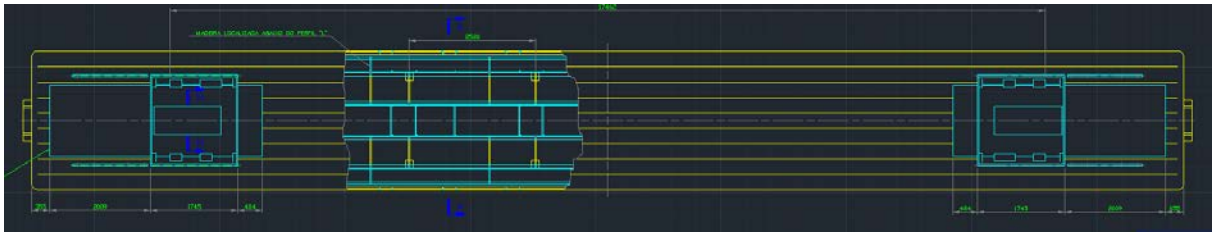

Figura 16 - Vista superior do teto do trem de passageiros.

Por conta das estruturas existentes nas duas extremidades do teto do vagão, a área que pode ser utilizada para a instalação dos painéis se resume ao *vão central*, que compreende uma área de aproximadamente 14,5 m de comprimento por 1 m de largura, em cada face do teto.

Em função de que cada painel proposto possui:

Comprimento: 1,662 m

Largura: 0,990 m

o número máximo de painéis que podem ser instalados em cada face do teto do vagão é de:

$$\boldsymbol{Número\ de\ painéis/face = \frac{14,5}{1,662} = 8}$$

Então, podemos instalar até 16 painéis no teto do vagão, que totaliza uma área de 26,32 m^2 ocupada pelos painéis.

Para calcular a potência real produzida em cada painel instalado, utilizamos a expressão:

$$\boldsymbol{Potência\ real = Potência\ nominal - \frac{Potência\ nominal \cdot Coeficiente\ de\ temperatua \cdot Variação\ térmica}{100}}$$

Levando em conta que:

Potência nominal ⇨ $29{,}8 \cdot 8{,}23 = 245{,}254\ W$

Coeficiente de temperatura ⇨ 46 %

Temperatura de operação ⇨ 45 ºC

Temperatura STC ⇨ 25 ºC

temos:

$$\boldsymbol{Potência\ real = 245{,}254 - \frac{245{,}254 \cdot 0{,}46 \cdot (45 - 25)}{100} = 222{,}69\ W/painel}$$

A produção diária de energia pelos painéis é dada pela expressão:

$$\boldsymbol{Energia\ gerada = Potência\ real \cdot Quantidade\ de\ painéis \cdot Horas\ de\ insolação}$$

Considerando:

Número de painéis instalados = 16

Horas de insolação diária = 5 horas

Teremos:

$$\boldsymbol{Energia\ gerada = 222{,}69 \cdot 16 \cdot 5 = 17.815{,}25\ Wh/dia}$$

Conforme mostrado na Figura 17, os 16 painéis são ligados num circuito de 8 paralelos de 2 série, com:

Tensão ⇨ $2 \cdot 29{,}8 = 59{,}6\ V$;

Corrente ⇨ $8 \cdot 8{,}23 = 65{,}84\ A$;

Potência nominal ⇨ $59{,}6 \cdot 65{,}84 = 3.924\ W$

Capacidade ⇨ $17{,}815\ kWh/dia$.

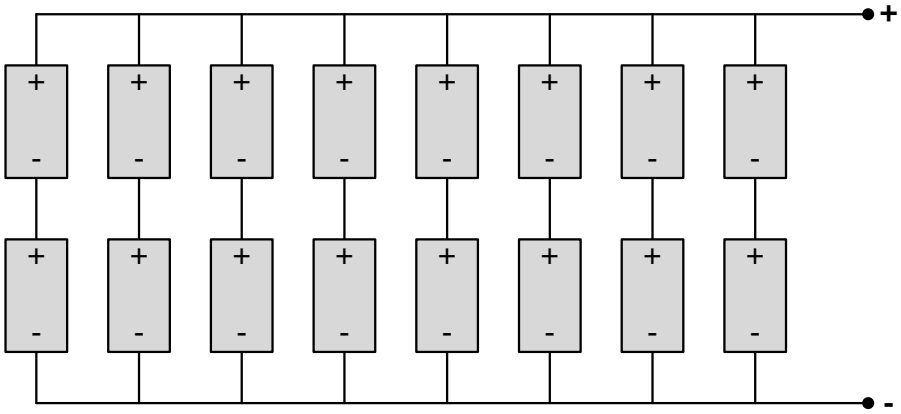

Figura 17 - Ligação dos painéis

O painel solar é o primeiro gargalo do projeto, visto que o total de energia elétrica gerada é fundamentado.na sua capacidade de conversão e na relação espaço x eficiência.

Buscando uma maior produção de energia estudamos também a possibilidade de utilização do painel modelo X21-345, fornecido pela Sunpower Corp, com maior eficiência de conversão (21,5 %) do que o KD245GH-4FB da Kyocera (14,8 %), cujas especificações são apresentadas na Tabela 2 e que possui como dimensões:

Comprimento ⇨ 1,559 m

Largura ⇨ 1,046 m

Tabela 2 - Painel Sunpower Corp X21-345

ELECTRICAL DATA		
	X21-335-BLK	**X21-345**
Nominal Power[12] (Pnom)	335 W	345 W
Power Tolerance	+5/–0%	+5/–0%
Avg. Panel Efficiency[13]	21.1%	21.5%
Rated Voltage (Vmpp)	57.3 V	57.3 V
Rated Current (Impp)	5.85 A	6.02 A
Open-Circuit Voltage (Voc)	67.9 V	68.2 V
Short-Circuit Current (Isc)	6.23 A	6.39 A
Maximum System Voltage	600 V UL ; 1000 V IEC	
Maximum Series Fuse	20 A	
Power Temp Coef. (Pmpp)	–0.30% / °C	
Voltage Temp Coef. (Voc)	–167.4 mV / °C	
Current Temp Coef. (Isc)	3.5 mA / °C	

Desta forma:

$$\textbf{Número de painéis/face} = \frac{14,5}{1,559} = 9$$

$$\textbf{Potência real} = 345 - \frac{345 \cdot 0,30 \cdot (45 - 25)}{100} = 324,30\ W/painel$$

$$\textbf{Energia gerada} = 324,30 \cdot 18 \cdot 5 = 29,187\ Wh/dia$$

Como pode ser visto, um aumento de 6,7 % na eficiência dos painéis utilizados, produziu um ganho de 63,83 % na geração de energia.

3.3 Detalhamento da carga

É possível dividir as 30 unidades do trem de passageiros em sua formação máxima, em grupos funcionais, cada um com uma determinada função e com diferentes cargas demandadas, para que se faça o cálculo geral da carga demandada.

Na Tabela 3 está mostrado um descritivo da demanda de carga em [kVA] do trem de passageiros.

Tabela 3 - Carga demandada em [kVA]

Vagão (posição)	Quantidade	Circuito de iluminação		Tomadas de uso geral	Carregador de notebook	TV de LED	Ar condicionado	Forno elétrico	Forno de micro-ondas	Refrigerador	[kVA] / vagão	[kVA] total
		0,7 kVA	1,0 kVA	2,0 kVA	0,060 kVA	0,010 kVA	22,4 kVA	14,7 kVA	3,2 kVA	0,3 kVA		
Lanchonete (7 e 16)	2	1					2	4	2	4	**111,90**	**223,80**
Classe executiva	4		1	1	60	60	2				**52,00**	**208,00**

(1 a 4)												
Classe econômica (9 a 15 e 17 a 28)	19		1	1	80	80	2				**53,40**	**1.014,60**
Restaurante (8)	1		1				2				**45,8**	**45,80**
Bagagens (6)	1		1				2				**45,8**	**45,80**
Especial (5)	1		1	1	60	60	2				**52,00**	**52,00**
											Total	**1.590,00**

A potência em [kW] de cada item que compõe os circuitos de cada vagão descrito acima se encaixam na Tabela 3.

Para que seja criada uma base de comparação entre a energia fornecida e a carga demandada, é necessário que se obtenha os valores de consumo em [kWh] de cada um dos vagões, como mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Carga demandada em [kW]

Vagão (posição)	Quantidade	Circuito de iluminação		Tomadas de uso geral	Carregador de notebook	TV de LED	Ar condicionado	Forno elétrico	Forno de micro-ondas	Refrigerador	[kW] / vagão	[kW] total
		0,630 kW	0,900 kW	1,800 kW	0,054 kW	0,007 kW	20,600 kW	13,500 kW	3,000 kW	0,290 kW		
Lanchonete (7 e 16)	2	1					2	4	2	4	**102,99**	**205,98**
Classe executiva (1 a 4)	4		1	1	60	60	2				**47,56**	**190,24**
Classe econômica (9 a 15 e 17 a 28)	19		1	1	80	80	2				**48,78**	**926,82**
Restaurante (8)	1		1				2				**42,10**	**42,10**
Bagagens (6)	1		1				2				**42,10**	**42,10**
Especial (5)	1		1	1	60	60	2				**47,56**	**47,56**
											Total	**1.454,80**

Tabela 5 - Consumo total em [kWh]

Vagão (posição)	Quantidade	Circuito de iluminação		Tomadas de uso geral	Carregador de notebook	TV de LED	Ar condicionado	Forno elétrico	Forno de micro-ondas	Refrigerador	[kWh] / vagão	[kWh] total
		0,630 kW	0,900 kW	1,800 kW	0,054 kW	0,007 kW	20,600 kW	13,500 kW	3,000 kW	0,290 kW		
		13 h	13 h	2 h	2h	13 h	6,5	3 h	2 h	5,5 h		
Lanchonete (7 e 16)	2	1					2	4	2	4	**913,17**	**1.826,34**
Classe executiva (1 a 4)	4		1	1	60	60	2				**577,18**	**2.308,72**
Classe econômica (9 a 15 e 17 a 28)	19		1	1	80	80	2				**579,34**	**11.007,46**
Restaurante (8)	1		1				2				**548,14**	**548,14**
Bagagens (6)	1		1				2				**548,42**	**548,42**
Especial (5)	1		1	1	60	60	2				**577,18**	**577,18**
											Total	**16.816,32**

Alguns dos itens já possuem o valor de consumo diário determinado pelo próprio fabricante, não sendo necessário o cálculo.

Os valores de consumo total calculados na tabela foram embasados pela expressão:

$$C_t = 1,25 \cdot \left(\sum \frac{n \cdot P \cdot H}{CiU} \right) [Wh]$$

$1,25$ ⇨ fator de segurança para garantia operacional do sistema;

n ⇨ número de itens;

P ⇨ potência unitária de cada item, expressa em $[W]$;

H ⇨ horas de uso no período de 1 dia;

CiU ⇨ ciclo de uso; sendo diário é representado por 1.

Comparando os valores de demanda para cada tipo de vagão, mostrados na Tabela 4, com a capacidade de fornecimento do arranjo dos 16 painéis solares, que é de 17,815 kWh, concluímos que os painéis solares não são capazes de fornecer sozinhos a demanda de cada um dos vagões.

Isso, aponta para a necessidade de um sistema de geração de energia solar do tipo híbrido, onde um gerador primário atua em conjunto com um módulo de armazenamento da energia gerada pelos painéis solares, para auxiliá-lo no suprimento da carga, reduzindo assim o consumo de combustível por parte do grupo motor-gerador.

Outra solução viável para a utilização da tecnologia é separar as cargas dos vagões em circuitos possíveis de serem alimentados pelos painéis solares.

A decisão da separação dos circuitos é tomada baseada nas atuais tecnologias de

sistemas solares residenciais, que em sua grande maioria são dimensionados para um consumo de aproximado de 5 kWh por dia, ou 150 kWh/mês.

As cargas mais impactantes são separadas, para que sejam alimentadas pelo gerador primário.

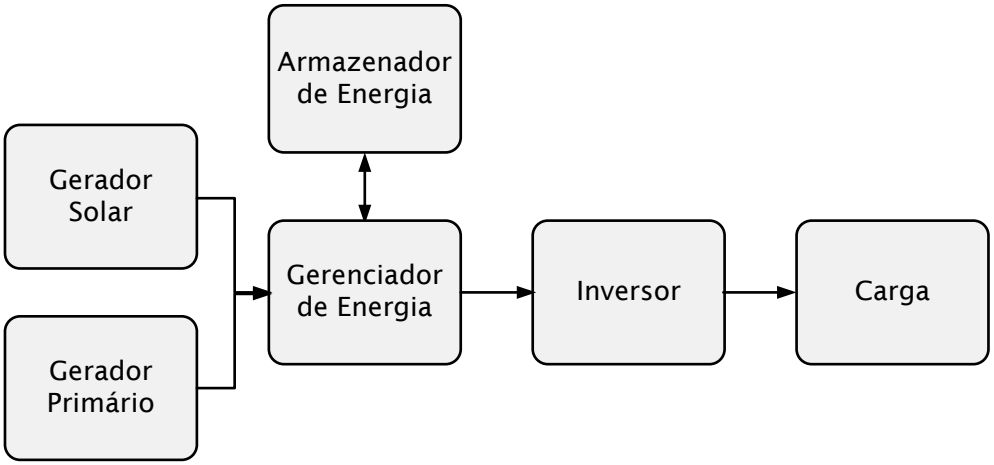

Figura 18 - Alimentação dos trens de passageiros com sistema híbrido

3.4 Redução de consumo de diesel pelo gerador primário

Ainda que não substitua por completo o gerador primário, o gerador solar gera energia suficiente para suprir parte da carga, reduzindo o uso do motor diesel-elétrico.

Este motor tem um consumo de óleo diesel proporcional à sua produção de energia elétrica, o que torna possível determinar a quantidade de combustível economizado quando parte dos circuitos passam a ser alimentados pelo sistema solar.

Dados históricos obtidos de máquinas diesel elétricas descrevem a relação com o consumo de 0,3 litros/kWh gerado.

O gerador solar composto por painéis KD245GH-4FB da Kyocera terá uma capacidade de geração diária de $28 \cdot 17{,}815 = 498{,}827\ kWh$.

Desta forma, podemos ter uma redução no consumo de diesel de $0{,}3 \cdot 498{,}827 = 149{,}65\ litros/dia$.

O gerador solar composto por painéis X21-345 da Sunpower Corp terá uma capacidade de geração diária de $28 \cdot 26{,}501 = 742{,}028\ kWh$.

Desta forma, podemos ter uma redução no consumo de diesel de $\boldsymbol{0{,}3 \cdot 742{,}028 = 222{,}61\ litros/dia}$.

4 Conclusões

Cabe ressaltar que o direcionador desse estudo foi o aspecto tecnológico e não o econômico.

Portanto, o objetivo do estudo não é de demonstrar a viabilidade do modelo de aplicação, mas sim, a importância de se buscar formas de energia alternativa para substituição, ainda que por um pequeno percentual, do consumo de diesel pelos geradores primários.

Os painéis utilizados no estudo estão baseados no estágio atual tecnologia disponíveis comercialmente, vendidos para pequenos/médio projetos, e possuem sua eficiência limitada.

Entretanto, é importante ressaltar que as especificações aqui citadas não são estacionárias e estão evoluindo com muita rapidez.

Neste caso em específico, podem ser fabricados painéis sob encomenda e com tecnologias mais evoluídas, inclusive as que ainda estão presentes no ambiente de pesquisa, que atingem níveis de eficiência muito superiores.

Outra forma de aplicar os painéis solares seria nas laterais do vagão, mas inviável por conta de limitações de espaço e por atos de vandalismo.

Por se tratar de um vagão de passageiros, as janelas cobrem o pouco espaço que poderia ser destinado à aplicação.

Do ponto de vista da carga atendida, podemos convertê-la em economia de diesel para o sistema de geração primária e garantir o projeto como uma excelente opção de um *trem verde*, que tem no seu processo de geração de energia, a redução do consumo de combustível fóssil, além da redução nas emissões de particulados.

5 Referências Bibliográficas

[1] Rodrigues de Souza - F. - **Estudo de Viabilidade de Implantação do Uso de Energia Solar e Outras Fontes de Energia Alternativas para Aplicações em Trem de Passageiros na Vale** – Departamento de Engenharia Elétrica da UFES – 2013

[2] http://www.kyocerasolar.com.br/modulos-solares/kd245gh-4fb.html

[3] http://us.sunpower.com/sites/sunpower/files/media-library/data-sheets/ds-x21-series-335-345-residential-solar-panels-datasheet.pdf

[4] http://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html