

Evaluation of the Success of a Small-Scale Photovoltaic Energy System

P. Rigo, J. Siluk, D. Lacerda, V. Thomasi, G. Rediske, and C. Rosa

Abstract—Solar photovoltaic energy generation is growing in Brazil and in the world. Considered a new investment alternative, many investors lack knowledge and difficulty in evaluating the success it will have with photovoltaic systems. This study aims to evaluate the percentage of investor success in a small scale photovoltaic power generation project in Brazil. A measurement modeling was developed through the methodology MCDM (AHP) and Key Performance Indicators (KPI). The case study was in a system of a supermarket of the state of Rio Grande do Sul, of 75kW of installed power. For the analysis of the importance of KPIs, 29 photovoltaic entrepreneurs in Brazil participated in the research. Analysis of the importance levels of the 33 KPI by the investor and the experts resulted in a 73.25% success rate of the project, classifying it as "Potential Success.". Systematic analysis of a high initial capital investment is important in assisting the investor in decision making. The 33 KPI is relevant to an assessment of investor success.

Index Terms—Multicriteria Decision, Performance Measurement, Solar Photovoltaic Energy.

I. INTRODUÇÃO

NO Brasil a energia provinda de hidrelétricas representou, em 2018, cerca de 60,79% na matriz energética, seguida dos combustíveis fósseis com 26,55% [1]. Há uma crescente busca por reduzir dependências da fonte hídrica sem recorrer às fontes não sustentáveis de geração de energia elétrica. Uma das alternativas é investir na Geração Distribuída (GD). A GD consiste na geração de eletricidade local com conexão nas redes de distribuição próximas ao consumidor [2].

Com a extensa área territorial brasileira e o predomínio da geração hidrelétrica, as usinas centralizadas de geração de eletricidade e os centros de consumo apresentam-se em geral distantes entre si, o que exige longas linhas de transmissão causando significativa perda de energia, cerca de 15% [3]. Desta forma, a implementação de sistemas de GD conectados à rede elétrica apresenta uma redução de perdas, potencializando a diversificação da matriz energética do país e poderá causar diminuição em investimentos para o aumento da capacidade de subestações e linhas de transmissão [4].

Em abril de 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a Resolução Normativa nº482/2012 [5],

Paula D. Rigo, Julio C. M. Siluk, Virginia Thomasi e Graciele Rediske, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, (pauladonaduzzi@gmail.com, jsiluk@ufsm.br, virginiaathomasi.br@gmail.com, gra_rediske@hotmail.com).

Daniel. P. Lacerda, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Vale dos Sinos, São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Brasil (DLACERDA@unisinus.br).

Carmen B. Rosa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil (carmenbrosa@gmail.com).

criando uma nova classe de geradores e consumidores, a chamada micro e minigeração distribuída. Além deste conceito, estabeleceu padrões de interconexão para esses projetos. A geração de eletricidade em pequena escala pode se conectar a sistemas de distribuição em todo o país através de um mecanismo de medição, sem a necessidade de apresentar registro como participante do mercado de energia [6]. Usinas fotovoltaicas (FV) se apresentam como solução devido ao impacto positivo causado ao meio ambiente e, associadas à geração distribuída, apresentam vantagens econômicas [7]. Em 2019 a geração FV representa mais de 80% do potencial instalado em GD [8].

As empresas integradoras são responsáveis pela venda, instalação e suporte dos sistemas de geração FV ao consumidor final. Porém, a maioria dos orçamentos solicitados a essas empresas não são aprovados pelos clientes, logo, não são implementados. A taxa de conversão de orçamentos em vendas foi de 6,88% em 2018, com média de 3,24 vendas mensais por empresa [9]. A taxa de apenas 6,88% se deve ao nível de incerteza quanto ao sucesso do investidor com o investimento na geração de eletricidade distribuída, já que a população não possui um alto nível de conhecimento sobre as tecnologias de geração FV e sobre o mercado de energia [10].

Este estudo tem como objetivo avaliar a porcentagem de sucesso do investidor de um projeto de geração de energia FV em pequena escala no Brasil. Com isso, a principal contribuição deste estudo está na elaboração de um sistema de avaliação de desempenho que mensura o nível de sucesso que o investidor terá com a implementação do sistema de geração FV, que poderá ser utilizado para a avaliação de demais projetos de geração FV no Brasil e também de países economicamente semelhantes. O sucesso é considerado como o nível de atingimento dos objetivos desse investidor. Então, para a avaliação do sucesso é impreterível que seja considerada as expectativas do investidor. Mas além disso, a avaliação de empresários do ramo de geração FV perante os fatores do sucesso é necessária para auxiliar o investidor em sua análise. Tornando necessário mensurar as diferentes opiniões no mesmo sistema de mensuração de desempenho.

Na literatura, alguns estudos buscam minimizar o nível de incerteza quanto a decisão de investir em geração FV. Como o estudo de Tanaka et al. [11], que analisou descritivamente os fatores que influenciam na aquisição de sistemas fotovoltaicos no Japão, averiguou que o tempo médio para a tomada de decisão sobre investir é de quatro meses, e que diversos fatores influenciam nessa decisão, como renda, tamanho da casa, tamanho da família e tarifa de energia. Já os autores Holtorf et al. [12] e [13] tiveram como objetivo desenvolver

um modelo para medir o sucesso de sistemas solares que verifica o atingimento dos objetivos de cada stakeholder, porém, estes estudos focam no segmento de mercado de eletrificação rural não conectada à rede, e o modelo não serve como um diagnóstico para a tomada de decisão sobre o investimento, mas sim, como um amparo ao planejamento desse mercado. No contexto brasileiro, o estudo desenvolvido por Rosa, Siluk e Michels [14] apresenta um instrumento para medir o nível organizacional de inovação na geração fotovoltaica distribuída no Brasil, trazendo fatores pertinentes a análise de entrada dessa tecnologia no Brasil. Estes estudos são relacionados ao contexto desta pesquisa, mas divergem quando não mensuram o nível de sucesso que o investidor terá com a implementação do sistema de geração FV.

Este trabalho encontra-se organizado da seguinte forma: O capítulo II trata da metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho. No capítulo III encontra-se os resultados e discussões a respeito do estudo. Por fim, o capítulo IV apresenta a conclusão obtida com esta pesquisa.

II. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Três procedimentos gerais foram realizados: Revisão Sistemática da Literatura (RSL) [15], [16], a construção do Sistema de Mensuração de Desempenho (SMD) [17], [18] e o Estudo de Caso. A metodologia RSL foi utilizada para a seleção dos Fatores Críticos de Sucesso (FCS) para a micro e minigeração FV. A RSL respondeu a seguinte questão de revisão sistemática: Quais são os Fatores Críticos de Sucesso em projetos de Geração Fotovoltaica? Da RSL são extraídos os FCS, que podem ser agrupados em FCS de maior nível e em Pontos de Vista Fundamentais (PVF). Quando agrupados, esses três níveis formam uma árvore hierárquica. Essas são as etapas 1 a 2 da Fig. 1, que representa o procedimento da pesquisa.

A construção da árvore hierárquica com os indicadores (*Key Performance Indicators – KPI*) é necessária para a aplicação da Análise Hierárquica de Processos (AHP), pertencente aos métodos *Multiple-criteria decision analysis* (MCDA). MCDA é um conjunto de métodos de apoio à tomada de decisão quando dois ou mais critérios são considerados concomitantemente. A AHP foi utilizada para formular o modelo matemático do Sistema de Mensuração de Desempenho (SMD) de avaliação do sucesso. Para isso, foram desenvolvidos os instrumentos de coleta dos dados. O primeiro instrumento teve como objetivo coletar os níveis de importância dos KPI conforme a análise par-a-par da AHP, transformando a opinião sobre a importância dos KPI para o atingimento do sucesso em números que representam a ponderação do sistema de mensuração. O segundo instrumento mensura cada KPI, assim, alternativas de “a” a “e” foram construídas, para que o investidor possa responder em qual nível seu sistema fotovoltaico encontra-se em cada KPI. Essas são as etapas 3 a 4 da Fig. 1.

Após a construção dos KPI e dos instrumentos de coleta de dados, foi realizada a etapa 5 referente a coleta de dados. A coleta de dados do estudo de caso foi realizada em um Supermercado de Santa Maria, no Rio Grande do Sul, Brasil.

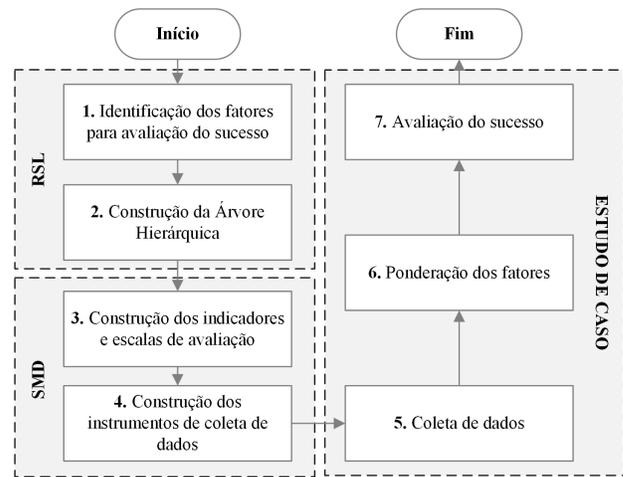


Fig. 1. Procedimento da pesquisa.

O sistema de geração FV instalado foi considerado o maior da cidade até dezembro de 2018, com capacidade de geração de 75kW, caracterizada como microgeração distribuída. A pesquisa foi realizada presencialmente com o decisor do investimento.

Para auxiliar o investidor na ponderação, empresários do ramo de geração FV responderam ao primeiro questionário, indicando o nível de importância de cada KPI para o atingimento do sucesso do investidor. Um total de 29 empresários do ramo de geração FV participaram da pesquisa, respondendo ao primeiro instrumento de coleta de dados. As características desses empresários podem ser observadas na Tabela I.

TABELA I
CARACTERÍSTICAS DOS EMPRESÁRIOS

	Características dos Empresários	Número de Empresários
Estado brasileiro de origem	Bahia	2
	Distrito Federal	2
	Goiás	2
	Minas Gerais	2
	Paraná	2
	Pernambuco	1
	Rio de Janeiro	2
	Rio Grande do Sul	7
	Santa Catarina	4
	São Paulo	4
Rondônia	1	
Faixa de Idade	Entre 24 e 30 anos	10
	Entre 31 e 40 anos	7
	Entre 41 e 50 anos	7
	Entre 51 e 63 anos	5
Formação acadêmica	Pós-grad.: Doutorado na Área de Energias	1
	Pós-grad.: Mestrado na Área de Energias	5
	Graduação: Administração	5
	Graduação: Engenharia Elétrica	13
	Graduação: Engenharia Mecânica	1
	Graduação: Engenharia civil	1
	Graduação: Sistemas de informação	1
Médio: Técnico em eletrotécnica	2	

A confiabilidade das respostas dos empresários foi medida com o Coeficiente Alpha de Crombach. Esse coeficiente busca estimar a confiabilidade de um questionário aplicado em uma pesquisa, calculado a partir da variância dos itens individuais

e da variância da soma dos itens de cada avaliador de todos os itens de um questionário. O valor do alpha deve ser positivo, variando entre 0 e 1, possuindo os seguintes julgamentos para a consistência dos dados: muito boa quando superior a 0,9; boa entre 0,8 e 0,9; razoável entre 0,7 e 0,8; fraca entre 0,6 e 0,7; e inadmissível quando inferior a 0,6. Então, o cálculo do Alpha de Crombach para este conjunto de dados resultou em 0,91, obtendo o melhor nível de julgamento de consistência das respostas dos empresários.

Após obtidos os dados de ponderação do investidor e dos 29 empresários por meio da aplicação do primeiro instrumento de coleta de dados, foi possível realizar o cálculo de ponderação, transformando a árvore hierárquica em um sistema de mensuração. Assim, conclui-se a etapa 7 com o resultado do nível de sucesso que o investidor possui, por meio da mensuração dos KPI, coletados no segundo instrumento de pesquisa.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dessa pesquisa são divididos em quatro subseções: Os fatores para avaliação do sucesso extraídos da RSL, apresentados através da árvore hierárquica; os dois instrumentos de coleta de dados, compondo o SMD; a ponderação dos fatores por meio dos especialistas e do investidor do estudo de caso; e a avaliação do sucesso.

A. RSL - Fatores para Avaliação do Sucesso

Ao realizar a extração dos FCS, estes foram subdivididos entre os PVF técnicos, econômicos, ambientais, sociais [12][19][20][21][22][23][24], mercadológicos [12][20][25] e políticos [20][22][23]. A árvore hierárquica apresentada na Fig. 2 é composta por seis PVF e dois níveis de FCS. Para cada último fator da árvore existe um KPI, totalizando 33 KPI.

B. SMD - Instrumentos de Coleta de Dados

Os seis PVF são comparados par-a-par, no momento em que o respondente confronta a importância dos fatores em duplas. As ponderações pareadas são baseadas na metodologia AHP. Por isso, para cada respondente, uma matriz de pesos é desenvolvida e utilizam-se as fórmulas da AHP para calcular o peso dos PVF e da Relação de Consistência (RC) da matriz de pesos. Foi aplicado um questionário de ponderação pareada, com um total de 15 questões, comparando os seis PVF.

Ao responder o questionário de 15 questões (15 variáveis a_{ij}), o respondente aponta quais são os PVF mais importantes para o seu sucesso. Essa ponderação pode ser de 1 a 4. Sendo que a alternativa “equivalentes” significa que os PVF são considerados de igual importância, ou seja, de peso igual a 1. Quando um dos fatores é mais importante que o comparado, isso pode ser representado em uma escala de 2, 3 ou 4 vezes mais importante, com isso, tem-se a matriz de julgamentos A da Equação 1. Dessa forma, os pesos dos PVF são calculados, resultando na matriz de pesos w_{PVF_p} onde $p = \{1, 2, \dots, 6\}$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & a_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{16}^{-1} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

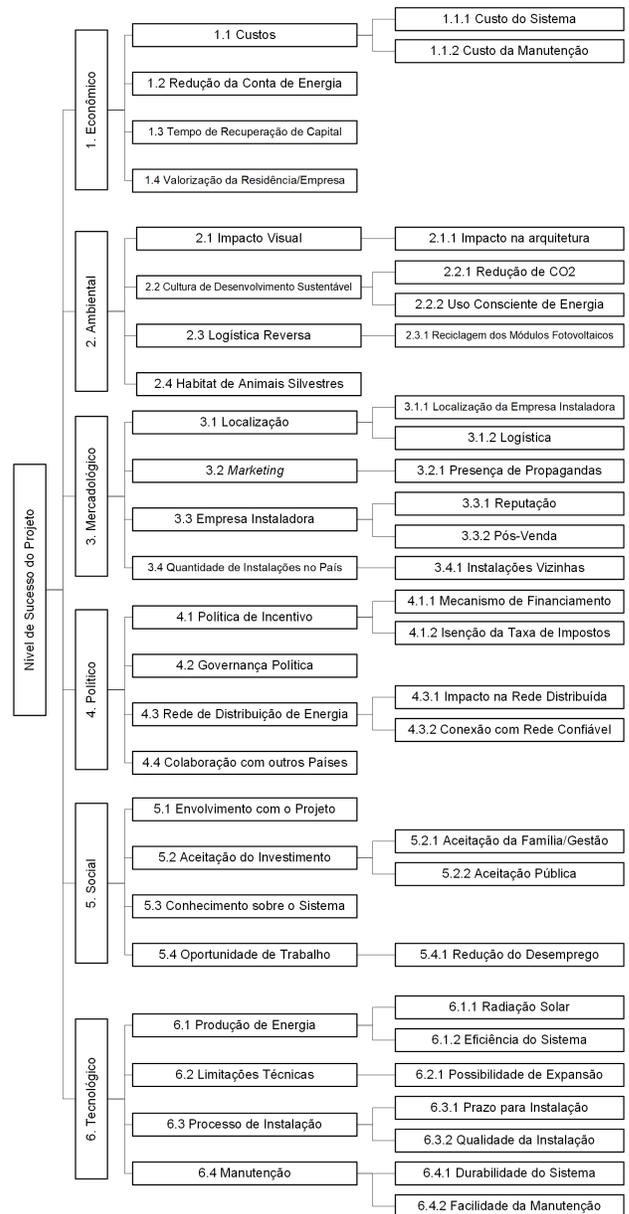


Fig. 2. Árvore hierárquica.

Após esse processo, a ponderação de cada KPI (w_{KPI_k}) ($k = \{1, 2, \dots, 33\}$) não é realizada par-a-par devido ao alto número de KPI. O respondente aponta o nível de importância de cada KPI em uma escala linear de 5 pontos, na qual 1 é pouco importante e 5 muito importante. O peso do KPI perante o PVF associado a ele é calculado. Para calcular o peso global (wg_k) do KPI na árvore hierárquica, esse peso é multiplicado pelo peso do PVF, conforme a Equação 2.

$$wg_k = w_{PVF_p} \cdot w_{KPI_k} \quad (2)$$

O próximo instrumento de coleta de dados é o questionário de mensuração dos KPI. Cada KPI é mensurado em 5 níveis, de “a” a “e”, sendo que na alternativa “a” o respondente está mais distante de atender ao objetivo, atingindo 0% do KPI e a alternativa “e” o respondente está atendendo completamente

ao objetivo, atingindo 100% do KPI (KPI_k). Cada KPI poderá ter 5 mensurações diferentes. Para calcular o sucesso do investidor (S) é multiplicado o peso global do KPI pela sua mensuração, conforme a Equação 3.

$$S = \sum_{k=1}^m (wg_k \cdot KPI_k) \quad (3)$$

Para julgamento do sucesso, uma escala de avaliação foi criada, correspondente aos níveis de respostas da mensuração dos indicadores. Então, a cada 25 pontos percentuais, um julgamento é dado ao projeto. De 0% a 25% o projeto é de insucesso extremo, de 26% a 50% o projeto possui insucesso. De 51% a 75% é julgado como projeto de sucesso potencial e de 76% a 100% o projeto atinge o sucesso pleno.

C. Estudo de Caso - Ponderação dos Fatores

A comparação par-a-par dos PVF resultou em uma Relação de Consistência (RC) de 12,13% para o investidor e uma média de 14,08% para os 29 empresários. A consistência lógica para realização dos cálculos de RC se dá pela fórmula $RC = \frac{IC}{IR}$, onde IR denomina-se índice de consistência randômico e origina-se por meio de uma matriz recíproca de ordem n , com elementos não-negativos. Ainda, o índice de consistência é dado por $IC = \frac{\lambda_{max} - n}{(n-1)}$ onde λ_{max} é o maior autovalor da matriz de julgamentos. Para que haja consistência dos julgamentos é necessário um $RC \leq 0,10$ [26]. Com base nessas informações, o RC obtido para o investidor e para os empresários resultaram em um valor aproximado a 10%, considerando o alto número de comparações pareadas esse índice representa que o investidor e os especialistas apontaram julgamentos consistentes.

Os resultados dos julgamentos dos empresários podem ser observados na Tabela II, a qual apresenta os resultados da ponderação dos KPI, o peso dos PVF e o peso global dos KPI, que somados resultam em 100%.

Referente ao PVF Econômico, percebe-se que o KPI “Redução da Conta de Energia” é o mais importante, atingindo o peso de 8,17%. Esse KPI é seguido do “Custo do Sistema” com 7,14%, do “Tempo de Recuperação de Capital” com 7,00%, do “Custo de Manutenção” com 5,51% e “Valorização da Residência/Empresa” com 4,72%.

Analisando o PVF Tecnológico, verifica-se que o indicador “Qualidade da Instalação” é a mais importante, atingindo 3,30%, seguido da “Eficiência do Sistema” com 3,25%. A “Durabilidade do Sistema” apresentou uma média de 3,21% de importância. Enquanto que, a “Facilidade da Manutenção” apresentou 2,95%. Por fim, o “Prazo da Instalação” ficou com 2,80% e a “Possibilidade de Expansão” com 2,76%.

Sabe-se que o tempo de espera do investidor para instalação de seu sistema não resulta em perdas técnicas, mas pode resultar em insatisfação em relação ao processo de instalação para o investidor. Além disso, percebe-se que em relação ao PVF Econômico e Tecnológico, os PVF Mercadológico, Político, Ambiental e Social, não possuem elevados níveis de sucesso. O peso Global dos KPI apresenta ponderações semelhantes, onde os pesos mais elevados encontram-se no PVF

TABELA II
PONDERAÇÃO DOS ONDERAÇÃO DOS KPI PELOS EMPRESÁRIOS

	PVF	W_{PVF_p}	KPI	wg_k
Econômico	32,55%		Custo do Sistema	7,14%
			Custo da Manutenção	5,51%
			Redução da Conta de Energia	8,17%
			Tempo de Recuperação de Capital	7,00%
			Valorização da Residência/Empresa	4,72%
Ambiental	11,28%		Impacto Visual	2,49%
			Redução de CO2	2,32%
			Uso Consciente de Energia	2,51%
			Reciclagem dos Módulos Fotovoltaicos	1,88%
Mercadológico	15,27%		Habitat de Animais Silvestres	2,08%
			Localização da Empresa Instaladora	2,31%
			Logística	2,34%
			Presença de propagandas	2,34%
			Reputação da Empresa Instaladora	2,96%
			Pós-Venda	2,95%
Político	12,09%		Instalações Vizinhas	2,37%
			Mecanismo de Financiamento	2,39%
			Isenção da Taxa de Impostos	2,41%
			Governança Política	2,28%
			Impacto na Rede de Distribuição	1,73%
			Conexão com Rede de Dist. Confiável	2,01%
			Colaboração com outros Países	1,27%
Social	10,54%		Envolvimento com o Projeto	1,95%
			Aceitação da Família/Gestão	2,11%
			Aceitação Pública	2,02%
			Conhecimento Sobre o Sistema	2,28%
Tecnológico	18,28%		Redução do Desemprego	2,18%
			Eficiência do Sistema	3,25%
			Possibilidade de Expansão	2,76%
			Prazo para instalação	2,80%
			Qualidade da instalação	3,30%
			Durabilidade do Sistema	3,21%
			Facilidade da Manutenção	2,95%

Econômico, definindo o grau de importância da ponderação dada pelos empresários.

Na opinião dos empresários, o envolvimento com o projeto, o impacto na rede de distribuição e a reciclagem dos módulos fotovoltaicos, não são relevantes para o sucesso do investidor. Merece destaque, o fato de que ao final da vida útil dos módulos, o montante a ser substituído será significativo. Dessa forma, é importante destacar a importância da logística reversa como solução para reciclagem dos módulos fotovoltaicos.

A Tabela III apresenta os resultados da ponderação pelo investidor. Para o investidor, ao comparar par-a-par os fatores, o PVF Econômico é o mais importante (39,23%) no atingimento do seu sucesso. Sequencialmente, o investidor considerou o PVF Ambiental como o segundo mais importante para o atingimento de seu sucesso, com 23,73%. Os demais PVF somam 37% de relevância para o sucesso.

No PVF Econômico, os KPI “Custo do Sistema”, “Custo da Manutenção”, “Redução da Conta de Energia” e “Tempo de Recuperação de Capital” apresentam ponderações idênticas, com 8,53%. O KPI “Valorização da Residência/Empresa” difere dos demais apresentando 5,12%. Ainda que a valorização da residência/empresa seja o KPI de menor importância tanto para os empresários, como para os investidores, está se apresenta para o investidor como algo que motiva a compra do sistema fotovoltaico, o que torna mais atrativo.

No contexto do PVF ambiental, o investidor apontou a maioria dos KPI com 5,16%, com esse valor se encontra

TABELA III
PONDERAÇÃO DOS KPI PELO INVESTIDOR

	PVF	W _{PVF_p}	KPI	w _{g_k}
Econômico	39,23%		Custo do Sistema	8,53%
			Custo da Manutenção	8,53%
			Redução da Conta de Energia	8,53%
			Tempo de Recuperação de Capital	8,53%
			Valorização da Residência/Empresa	5,12%
Ambiental	23,73%		Impacto Visual	3,10%
			Redução de CO2	5,16%
			Uso Consciente de Energia	5,16%
			Reciclagem dos Módulos Fotovoltaicos	5,16%
			Habitat de Animais Silvestres	5,16%
Mercadológico	4,89%		Localização da Empresa Instaladora	0,82%
			Logística	0,82%
			Presença de propagandas	0,82%
			Reputação da Empresa Instaladora	0,82%
			Pós-Venda	0,82%
			Instalações Vizinhas	0,82%
Político	8,73%		Mecanismo de Financiamento	1,56%
			Isenção da Taxa de Impostos	1,56%
			Governança Política	1,56%
			Impacto na Rede de Distribuição	1,25%
			Conexão com Rede de Dist. Confiável	1,56%
			Colaboração com outros Países	1,25%
Social	10,96%		Envolvimento com o Projeto	2,09%
			Aceitação da Família/Gestão	2,61%
			Aceitação Pública	2,09%
			Conhecimento Sobre o Sistema	1,57%
Tecnológico	12,46%		Redução do Desemprego	2,61%
			Eficiência do Sistema	2,31%
			Possibilidade de Expansão	2,31%
			Prazo para instalação	2,31%
			Qualidade da instalação	2,31%
			Durabilidade do Sistema	2,31%
			Facilidade da Manutenção	0,92%

a “Redução de CO2”, o “Uso Consciente de Energia”, a “Reciclagem dos Módulos Fotovoltaicos” e o “Habitat de Animais Silvestres”. Na sequência, com ponderação inferior está o “Impacto Visual” com 3,10%. Uma justificativa pelo nível da ponderação ser menor é que os sistemas são instalados nos telhados das construções, o que na maioria das vezes não ficam visíveis e mesmo quando visíveis apresentam um impacto visual positivo que agrega uma iniciativa ambiental à construção.

Para o PVF Tecnológico, os investidores apontaram todos os KPI em níveis semelhantes. A “Eficiência do Sistema”, a “Possibilidade de Expansão, o “Prazo para instalação”, a “Qualidade da Instalação” e a “Durabilidade do Sistema” apresentaram uma ponderação de 2,31%, já a “Facilidade de Manutenção” ficou com 0,92%. Nota-se que as ponderações dos investidores para o PVF Tecnológico diferem das ponderações dos empresários, que apresentam maior importância na “Qualidade da Instalação”.

Por último, de forma a abranger os aspectos dos demais PVF que apresentaram pesos relativamente baixos em relação aos demais, destaca-se os PVF Social, Político e Mercadológico, respectivamente. No Social, a aceitação da família/gestão apresenta maior importância, os investidores acreditam que é necessário haver concordância de todos os envolvidos para que se possa discutir sobre o retorno da instalação do sistema. Já no Político e Mercadológico, os investidores adotaram ponderações semelhantes, com maior

destaque para o mecanismo de financiamento, a isenção da taxa de impostos, governança política e conexão com rede de distribuição confiável.

D. Estudo de Caso - Avaliação do Sucesso

A avaliação do sucesso foi realizada por meio de uma elaboração de limites estruturados pelos autores de acordo com as experiências vivenciadas durante o desenvolvimento do sistema de mensuração, avaliadas por três pesquisadores da área de geração FV. Isso objetiva facilitar a visão de investidores, em projetos de micro e minigeração distribuída, acerca dos potenciais de melhoria existentes na realidade do sistema. Além disso, utilizou-se 50% da percepção do investidor e 50% da opinião média dos 29 empresários no que tange à relevância dos critérios considerados na pesquisa. Os resultados encontram-se na Tabela IV.

TABELA IV
MENSURAÇÃO DOS KPI

	PVF	W _{PVF_p}	KPI	w _{g_k}	KPI _k
Econômico	35,89%		Custo do Sistema	7,84%	75%
			Custo da Manutenção	7,02%	100%
			Redução da Conta de Energia	8,35%	75%
			Tempo de Recup. de Capital	7,77%	100%
			Val. da Residência/Empresa	4,92%	75%
Ambiental	17,51%		Impacto Visual	2,79%	75%
			Redução de CO2	3,74%	100%
			Uso Consciente de Energia	3,83%	25%
			Recic. dos Módulos Fotov.	3,52%	0%
			Habitat de Animais Silvestres	3,62%	75%
Mercadológico	10,08%		Loca. da Empresa Instaladora	1,56%	100%
			Logística	1,58%	100%
			Presença de propagandas	1,58%	75%
			Rep. da Empresa Instaladora	1,89%	100%
			Pós-Venda	1,88%	100%
			Instalações Vizinhas	1,59%	75%
Político	10,41%		Mecanismo de Financiamento	1,97%	25%
			Isenção da Taxa de Impostos	1,99%	100%
			Governança Política	1,92%	0%
			Impacto na Rede de Dist.	1,49%	75%
			Con. com Rede de Dist. Conf.	1,79%	0%
			Colab. com outros Países	1,26%	50%
Social	10,75%		Envolvimento com o Projeto	2,02%	25%
			Aceitação da Família/Gestão	2,36%	100%
			Aceitação Pública	2,05%	75%
			Conhec. Sobre o Sistema	1,92%	50%
			Redução do Desemprego	2,39%	100%
Tecnológico	15,37%		Eficiência do Sistema	2,78%	100%
			Possibilidade de Expansão	2,53%	100%
			Prazo para instalação	2,56%	100%
			Qualidade da instalação	2,81%	100%
			Durabilidade do Sistema	2,76%	25%
			Facilidade da Manutenção	1,94%	25%

O modelo de diagnóstico mensurou em 73,25% o nível de sucesso do projeto, classificando como “Sucesso Potencial”. A partir disso, alguns indicadores precisam ser melhorados para que se obtenha um “Sucesso Pleno”. É possível verificar que dos 33 KPI, quatorze atingiram a mensuração de 100%, não sendo necessários aprimoramentos no projeto. Nove KPI atingiram 75%, considerados adequados para a implementação do projeto, os quais podem ser melhorados. Dez KPI apresentaram-se abaixo de 50% e devem ser observados pelo investidor.

Dentro do PVF Econômico, o mais relevante para a mensuração do sucesso, todos os KPI encontram-se acima de 75%. O investidor afirmou não estar completamente satisfeito com o KPI “Custo do Sistema”, o que resultou em um tamanho do sistema menor, possibilitando no KPI “Redução da Conta de Energia” de aproximadamente 75%. Dentro do PVF Ambiental destaca-se o KPI “Uso Consciente de Energia”, que é considerado extremamente importante pelo investidor, mas ele afirma ter uma cultura pouco avançada. Isso significa que se o investidor apostar em um programa de eficiência energética e conscientização ambiental no uso da energia, pode resultar em uma diminuição de gasto energético, fazendo com que o sistema passe a reduzir 100% da conta de energia, causando acréscimo no nível de sucesso nos três indicadores supracitados.

Outro KPI considerado extremamente importante pelo investidor, mas que ele afirma que “Nunca me preocupei com a reciclagem ou remanufatura dos módulos fotovoltaicos” é o KPI “Reciclagem dos Módulos Fotovoltaicos”. Se para o investidor o aspecto ambiental é importante, possuir uma cadeia reversa de reciclagem e aproveitamento dos materiais utilizados no sistema fotovoltaico deve ser buscada. No Brasil, sistemas fotovoltaicos começaram a ser instalados com maior força em 2015. Considerando uma durabilidade de 25 anos, em 2040 uma cadeia de logística reversa passará a ser solicitada no mercado de geração FV. No PVF Mercadológico, todos os KPI estão acima de 75%. O investidor optou por uma empresa integradora localizada na mesma cidade, não teve problemas com a logística dos insumos e está muito satisfeito com o processo de pós-venda. Além disso, o investidor considerou muito importante ter outras instalações presentes no mesmo bairro, assim, sentiu-se seguro em saber que a tecnologia era adequada.

O PVF Político foi o que obteve menores índices de mensuração. O investidor afirmou estar muito insatisfeito com as linhas de financiamento existentes nos bancos brasileiros, com taxas de juros elevadas e com comunicação pouco transparente. Com isso, afirmou haver apenas uma opção aceitável, o que viabilizou o investimento. Em contrapartida, está satisfeito com a isenção de alguns impostos, como o ICMS, PIS e COFINS sobre a energia injetada na rede de distribuição. Quando questionado sobre a confiabilidade da rede de distribuição, o investidor afirmou estar completamente insatisfeito. A rede de distribuição de energia da região costuma apresentar falhas com tempo de restabelecimento do serviço demorado.

No PVF Social dois KPI obtiveram baixos níveis de mensuração. O investidor afirma ter se envolvido muito pouco com o desenvolvimento do projeto, deixando todas as escolhas de insumos e definições do projeto com a empresa integradora. Isso se deve ao fato dele afirmar ter pouco conhecimento sobre a energia. Porém, a revisão de literatura realizada neste estudo afirma ser importante que o investidor tenha conhecimento sobre a energia para manter um bom nível de satisfação ao longo da vida útil do sistema e para prever a necessidade de futuras expansões.

No PVF Tecnológico dois KPI obtiveram baixos níveis de mensuração. O investidor afirma não estar satisfeito com a

durabilidade prevista para o sistema, sentindo-se frustrado com a necessidade de substituir os inversores e módulos com a obsolescência do sistema. Além disso, o local de instalação é considerado de difícil acesso, tornando a manutenção complexa e com a necessidade de que seja realizada por técnicos especializados. Porém, as empresas integradoras dificilmente realizam os serviços de limpeza de módulos, tornando uma dificuldade para o investidor e uma oportunidade de empreendimento para o Brasil. Diante da análise dos KPI, necessita-se de uma maior clareza nos fatores referentes a questões ambientais e políticas para que se obtenha um melhor nível de sucesso. A sensibilidade da ponderação dos fatores, quando considerado apenas as expectativas do investidor, revela uma mensuração do sucesso menor, de 72,44%, pois o investidor apontou nível de importância de 23,73% para o PVF Ambiental, mas atingiu apenas 12,65%. Se considerarmos apenas a opinião dos empresários, o sucesso eleva-se para 74,03%, também resultado do impacto do PVF Ambiental.

IV. CONCLUSÃO

Este estudo avaliou o sucesso do investidor de um projeto de geração FV de energia elétrica em pequena escala no Brasil. Para isso, foi desenvolvido um sistema de mensuração que considerou a opinião do investidor e de 29 empresários da área de geração FV. Esse sistema utilizou a metodologia MCDA-AHP e o conceito de KPI. Totalizando 33 KPI, o sistema mensurou em 73,25% o nível de sucesso do projeto, classificando como “Sucesso Potencial”. Então, é recomendado que o investidor analise os pontos que considera importante e que devem ser aprimorados, afim de elevar o atingimento do sucesso.

Mesmo que a energia elétrica provinda de uma fonte de tecnologia FV se mostre promissora no Brasil, com o número de instalações crescente em todo o país, o investimento é considerado de alto capital inicial e por isso, deve ser realizado por meio de uma análise sistemática. Os KPI propostos nesse estudo foram apresentados aos participantes da pesquisa, que os ponderaram em níveis de importância. Essas importâncias podem ser consideradas para a avaliação do sucesso de projetos de micro e minigeração distribuída FV de todo o país e de países economicamente semelhantes, como exemplo os países do MERCOSUL.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Geração Distribuída (INCTGD) com as agências financiadoras (CNPq processo 465640/2014-1, CAPES processo 23038.000776/2017-54 e FAPERGS 17/2551-0000517-1). Siluk e Lacerda são apoiados por bolsa de pesquisa de CNPq – Brasil (CNPq processo Siluk 311926/2017-7 e CNPq processo Lacerda 308694/2017-1).

REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL, “Matriz de Energia Elétrica,” 2018. [Online]. Available: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil.cfm>

- [2] A. Bess Alcantara Amaral, A. L. Zambelli Loyola Gonzaga Mendonca, A. Araujo Martins Resende, and E. Eduardo Rego, "Solar Energy and Distributed Generation: 2015, a Year of Inflection in Brazil?" *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 8, pp. 3731–3737, aug 2016. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7786357> <http://ieeexplore.ieee.org/document/7786357/>
- [3] E. B. Pereira, F. R. Martins, A. R. Gonçalves, R. S. Costa, R. Rutter, S. L. Abreu, G. M. Tiepoldo, S. V. Pereira, and J. G. de Souza, *Atlas Brasileiro de Energia Solar*, 2nd ed. São José dos Campos: INPE, 2017.
- [4] C. L. A. Dias, D. A. C. Branco, M. C. Arouca, and L. F. L. Legey, "Performance estimation of photovoltaic technologies in Brazil," *Renewable Energy*, vol. 114, pp. 367–375, 2017. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117306468>
- [5] ANEEL, "Resolução Normativa nº482, de 17 de abril de 2012." p. 12, 2012. [Online]. Available: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>
- [6] C. G. Garcez, "Distributed electricity generation in Brazil: An analysis of policy context, design and impact," *Utilities Policy*, vol. 49, pp. 104–115, 2017. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957178716300984>
- [7] O. Leite Vieira, F. J. Rodrigues da Silva, L. de Araujo Machado, A. Nunes Ferreira Correia, C. Tavares Vitoriano, A. Honorio Oliveira, R. Paiva Dias Franklin, J. C. Freire de Menezes, M. Francisco Apolinario, J. W. Ferreira do Nascimento, and P. C. Marques de Carvalho, "Comparison of Photovoltaic Plant Performance Estimation Models: A Case Study for Fortaleza, Brazil," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 7, pp. 1898–1906, jul 2018. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8447355/author> <https://ieeexplore.ieee.org/document/8447355/>
- [8] ANEEL, "Geração Distribuída," 2019. [Online]. Available: <https://app.powerbi.com/view>
- [9] Greener, "Estudo estratégico: Mercado Fotovoltaico de Geração Distribuída," p. 114, 2019. [Online]. Available: <https://www.greener.com.br/pesquisas-de-mercado/>
- [10] L. L. C. Santos, L. N. Canha, and D. P. Bernardon, "Projection of the diffusion of photovoltaic systems in residential low voltage consumers," *Renewable Energy*, vol. 116, pp. 384–401, 2018. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117309588>
- [11] K. Tanaka, M. Sekito, S. Managi, S. Kaneko, and V. Rai, "Decision-making governance for purchases of solar photovoltaic systems in Japan," *Energy Policy*, vol. 111, pp. 75–84, 2017. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421517305724>
- [12] H. Holtorf, T. Urmee, M. Calais, and T. Pryor, "A model to evaluate the success of Solar Home Systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 50, pp. 245–255, 2015.
- [13] —, "Incorporating the Institutions' Perspective into a Proposed Model for Assessing Success of Solar Home System Implementations," in *4th Development in the in Renewable Energy Technology (ICDRET)*, no. 1. Dhaka, Bangladesh: IEEE, 2016. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7421515/>
- [14] C. B. Rosa, J. C. M. Siluk, and L. Michels, "Proposal of the Instrument for Measuring Innovation in the Generation Photovoltaics," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 11, pp. 4534–4539, 2016.
- [15] A. Dresch, D. P. Lacerda, and J. A. V. Antunes Júnior, *Design science research: A method for science and technology advancement*. New York: Springer, 2014.
- [16] D. Gouch, S. Oliver, and J. Thomas, *An Introduction to Systematic Reviews*, SAGE, Ed., London, 2012.
- [17] M. Moullin, "Performance measurement definitions: Linking performance measurement and organisational excellence," *International Journal of Health Care Quality Assurance*, vol. 20, no. 3, pp. 181–183, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1108/09526860710743327>
- [18] R. Simons, *Performance Measurement and Control Systems for Implementing Strategy: Text and Cases*. New York: Prentice Hall, 2000.
- [19] J.-J. Wang, Y.-Y. Jing, C.-F. Zhang, and J.-H. Zhao, "Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 9, pp. 2263–2278, 2009. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109001166>
- [20] E. Heo, J. Kim, and K.-J. Boo, "Analysis of the assessment factors for renewable energy dissemination program evaluation using fuzzy AHP," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 8, pp. 2214–2220, 2010. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110000286>
- [21] T. Urmee, "Social, cultural and policy issues of the application of remote area off-grid photovoltaic," in *52nd annual conference Australian Solar Energy Society*. Melbourne Australia: Australian Solar Council, 2014, p. 11. [Online]. Available: http://researchrepository.murdoch.edu.au/id/eprint/30340/1/application_of_remote_area_off-grid_photovoltaic.pdf
- [22] P. Lombardi, F. Abastante, S. Torabi Moghadam, and J. Toniolo, "Multicriteria Spatial Decision Support Systems for Future Urban Energy Retrofitting Scenarios," *Sustainability*, vol. 9, no. 7, pp. 1252–1265, 2017.
- [23] C. A. Friebe, P. von Flotow, and F. A. Täube, "Exploring the link between products and services in low-income markets—Evidence from solar home systems," *Energy Policy*, vol. 52, pp. 760–769, 2013. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512009196>
- [24] D. Süßer and A. Kannen, "'Renewables? Yes, please!': perceptions and assessment of community transition induced by renewable-energy projects in North Frisia," *Sustainability Science*, vol. 12, no. 4, pp. 563–578, jul 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11625-017-0433-5>
- [25] S. Movilla, L. J. Miguel, and L. F. Blázquez, "A system dynamics approach for the photovoltaic energy market in Spain," *Energy Policy*, vol. 60, pp. 142–154, 2013.
- [26] T. L. SAATY, *Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world*, 3rd ed. Pittsburgh, PA: RWS Publications, 2012.



Paula Donaduzzi Rigo graduated in Production Engineering in 2017, Master in Production Engineering in 2019 and doctor student in Federal University of Santa Maria. Her research area focuses on the management of photovoltaic energy. Currently, her main researches belong to the area of: Multicriteria Methods for Decision Making; Performance Measurement Systems; and small-scale energy generation.



Julio Cezar Mairesse Siluk PhD in Production Engineering from the Federal University of Santa Catarina in 2007. He is currently a teacher at the Federal University of Santa Maria. He has experience in the areas of Strategic Management, Innovation and Competitiveness, Performance Evaluation, Strategic Planning, Performance Indicators, Investment Analysis and Energy Management.



Daniel Pacheco Lacerda PhD in Production Engineering from the Federal University of Rio de Janeiro in 2009. He is currently a teacher at the Universidade do Vale do Sinus. He has experience in the areas of Operations Strategy, Business Process Engineering, Data Envelopment Analysis, Design Science Research and Restriction Theory.



Virginia Thomasi graduated in Production Engineering in 2019 and currently make master in Production Engineering in Federal University of Santa Maria. Her research area focuses on the management of photovoltaic energy. Her main researches belong to the area of power auctions.



Graciele Rediske graduated in Production Engineering in 2015 at the University of Santa Cruz do Sul, Master in Production Engineering in 2019 and doctor student in Federal University of Santa Maria. Her research are about photovoltaic energy and generation of energy distributed and centralized, focus on the Combination of Multicriteria Methods for Decision Making and Geographic Information System.



Carmen Brum Rosa graduated in Chemical Engineering in 2014, Master degree in Production Engineering from the Federal University of Santa Maria and she is doctor student in Electrical Engineering in Federal University of Santa Maria. Her main researches are Measurement of Organizational Performance, Competitiveness and Innovation, Performance evaluation in photovoltaic energy generation.