

V - 937 - USO DE OTIMIZAÇÃO PARA READEQUAÇÃO TARIFÁRIA DE CONSUMIDORES DE ENERGIA DO GRUPO A, UTILIZANDO A FERRAMENTA SOLVER

Renato Philippsen⁽¹⁾, Moacir Kripka⁽²⁾ e Márcio Tochetto⁽³⁾,

1 Engenheiro Eletricista pela Universidade de Passo Fundo - UPF. MBA em Gestão de Projetos - FGV. Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Passo Fundo – PPGEng/UPF. Engenheiro Eletricista do Departamento de Operação e Manutenção do Planalto – CORSAN. Passo Fundo, RS

2 Dr., Prof. do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Passo Fundo – PPGEng/UPF. Passo Fundo, RS

3 Engenheiro Civil pela Universidade Regional Integrada das Missões e Alto Uruguai - URI. Mestre em Infraestrutura e Meio Ambiente pela Universidade de Passo Fundo - UPF. Gestor de Departamento de Operação e Manutenção - CORSAN-RS. MBA em Gestão de Projetos - FGV. Passo Fundo, RS

Endereço⁽¹⁾: Travessa Mem de Sá, 55 – Vila Rodrigues – Passo Fundo - RS - CEP: 99070-430 - Brasil - Tel: (54) 99958 6188- e-mail: renato.philippsen@corsan.com.br, engenheiro.rph@gmail.com

RESUMO

Este artigo pretende demonstrar, através de um estudo de caso, a problemática da readequação tarifária de consumidores de energia de média e alta tensão utilizando técnica de otimização, através de análise histórica de consumos e demandas. Inicialmente foram apresentadas as metodologias e normativas referentes à tarifação de consumidores deste grupo, denominado Grupo A. Também foi caracterizado brevemente o que é otimização e uma forma simples de aplicá-la sem que se tenha profundo conhecimento dos modelos matemáticos de otimização. Ainda, foi demonstrado como se obter as informações necessárias para aplicar a resolução do problema, bem como é o equacionamento deste problema. Por fim, foi apresentado um caso real de utilização desta técnica, através da ferramenta Solver, do Microsoft Excel, utilizando os dados de faturas de energia reais. Os resultados apontam para uma potencial economia, com relação a readequação efetuada da forma usual.

PALAVRAS-CHAVE: Otimização, Readequação tarifária, Solver, Fatura de energia.

INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um insumo de extrema importância para qualquer tipo de edificação ou infraestrutura humana, seja ela residencial, comercial ou industrial. No Brasil, o fornecimento e comercialização de energia é regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), sendo essa a responsável por estipular como serão os contratos de fornecimento firmados entre as empresas fornecedoras de energia e os consumidores, considerando as diversas características de fornecimento.

Dentre estas características de fornecimento, uma delas é a contratação de demanda, que se aplica a clientes com faturamento em alta tensão (Grupo A). Para estes clientes, é obrigatória a contratação de um valor demanda, que tem o objetivo de indicar à empresa fornecedora de energia qual será o valor máximo de energia que será requisitado do seu sistema, a fim de que a mesma adeque a rede a qual o cliente está conectado para suportar esta demanda energética máxima (ANEEL, 2022).

O valor de demanda contratado pelo cliente será cobrado em todos os ciclos de faturamento, proporcionalmente, em relação a demanda máxima real aferida em cada ciclo de faturamento. Caso o consumidor em seu momento de maior consumo, não alcançar o valor contratado, será faturado o valor estabelecido em contrato. Por outro lado, no caso de o consumidor, em seu momento de maior consumo, ultrapassar o valor de demanda estabelecido em contrato, será faturado todo o excedente, com o adicional de uma tarifa extra, chamada de multa por ultrapassagem de demanda. Desta forma, para que o consumidor tenha o menor custo de energia, dentro de suas necessidades energéticas, é necessário que o comportamento do seu consumo seja o mais próximo possível do valor de demanda contratado (ANEEL, 2022).

Outra característica de fornecimento em consumidores do grupo A é a tarifa horo-sazonal. Neste caso, o consumidor tem duas opções de tarifas: a tarifa verde e a tarifa azul. A escolha entre uma ou outra deve ser analisado de acordo com a necessidade de o consumidor trabalhar no horário de ponta, que compreende o horário entre 18:00 e 21:00, em dias úteis. A tarifa verde é benéfica para o consumidor que consegue reduzir drasticamente o seu consumo neste horário, já a tarifa azul é benéfica para o consumidor que não consegue reduzir seu consumo no horário (ANEEL, 2022).

Ambos os casos supracitados devem ser escolhidos pelo consumidor para vigorar por um período de doze meses, sendo vedada a sua alteração antes deste prazo. Desta forma, fica claro que uma contratação assertiva é fundamental para maximizar a economia na fatura de energia. Porém, por muitas vezes se torna difícil estimar como será o comportamento de consumo de uma determinada instalação no decorrer dos próximos doze meses. Uma das formas de se estimar esse consumo é analisando o histórico dos últimos doze meses deste local.

A análise do histórico deve avaliar, para cada mês, o consumo no horário de ponta, o consumo fora do horário de ponta, a demanda no horário de ponta e a demanda fora do horário de ponta. Estes valores, então, devem ser submetidos ao cálculo tarifário com diferentes cenários de demanda contratada e tarifa horo-sazonal. Pode-se observar que este procedimento acarretará em um grande número de possibilidades para se estabelecer o melhor cenário.

Uma forma rápida e extremamente eficiente de se obter este melhor cenário é através de técnicas de otimização. Uma ferramenta que está amplamente difundida e disponível para praticamente qualquer consumidor é a ferramenta “*Solver*”, do *MS Excel*, que utiliza técnicas de otimização heurística e matemática para otimizar a solução de um problema.

No decorrer deste artigo, serão abordadas as definições básicas da otimização heurística, em especial da ferramenta *Solver*. Também são abordadas as metodologias de cálculo e demais definições do faturamento de consumidores de energia do Grupo A. Por fim, é apresentado um exemplo de utilização das técnicas de otimização para um problema desta natureza, trazendo os dados iniciais, a formulação matemática e o uso da ferramenta *Solver* para otimizar a solução.

O desenvolvimento desse trabalho contou com o apoio e a participação da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN-RS).

OBJETIVOS

- **Objetivo Geral**

Elaborar modelo de otimização, utilizando a ferramenta *Solver*, do *Microsoft Excel*, com o objetivo de estimar os valores de demanda de energia e modalidade de tarifa horo-sazonal em faturas de energia de consumidores do grupo A.

- **Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos são:

- a) contextualizar o funcionamento da tarifação de energia para consumidores do grupo A;
- b) contextualizar a metodologia de otimização;
- c) equacionar e elaborar um modelo de otimização genérico, utilizando a ferramenta *Solver*;
- d) utilizar e aferir o modelo em alguns exemplos reais de unidades consumidoras da CORSAN-RS.

MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho é desenvolvido através de metodologia descritiva, ou seja, inicialmente é realizada uma pesquisa bibliográfica, onde são compiladas informações a respeito dos tópicos abordados neste trabalho. A partir dos dados obtidos na pesquisa bibliográfica, é feito um estudo de caso em alguns exemplos reais. Por fim, o trabalho apresenta um diagnóstico a respeito dos resultados obtidos.

Para o estudo de caso, a foram escolhidas algumas unidades consumidoras de alta tensão (Grupo A) da Companhia Riograndense de Saneamento – CORSAN, especificamente da regional do Planalto, que abrange 70 municípios do estado do Rio Grande do Sul. Esta regional possui, em sua abrangência, um total de 75 unidades consumidoras que se enquadram no regime de faturamento AT (Grupo A).

FATURAMENTO DE ENERGIA

Diferentemente dos consumidores atendidos por baixa tensão, como é o caso da grande maioria das residências e pequenos comércios, que são faturados apenas pela energia consumida, em kWh, os consumidores atendidos por alta tensão, chamados de consumidores do Grupo A, tem um faturamento diferenciado, onde mais aspectos do consumo são considerados

Conforme a ANEEL, o consumidor do Grupo A é todo aquele que for atendido em média e alta tensão (acima de 2,3kV). Este consumidor, se tiver uma carga instalada entre 75 kVA e 112,5 kVA, pode optar por ser faturado em baixa tensão ou alta tensão. Já consumidores com carga instalada acima de 112,5 kVA são obrigatoriamente faturados em alta tensão. Atentar para o fato de que quando se fala em faturamento, a nomenclatura “alta tensão” se refere a clientes atendidos tanto por média tensão como por alta tensão (69kV ou mais). Uma vez que o consumidor tenha sido enquadrado no faturamento AT (alta tensão), seja voluntariamente ou compulsoriamente, o cálculo de sua tarifa será mais detalhado, levando-se em consideração as seguintes grandezas elétricas aferidas pelo medidor de energia da concessionária:

- **Consumo ativo na ponta TUSD (kWh):** Tarifa do uso do sistema de distribuição, proporcional ao montante de energia ativa mensal apurada no horário de ponta;
- **Consumo ativo fora de ponta TE (kWh):** Tarifa de energia, proporcional ao montante de energia ativa mensal apurada no horário fora de ponta;
- **Consumo ativo na ponta TE (kWh):** Tarifa de energia, proporcional ao montante de energia ativa mensal apurada no horário de ponta;
- **Consumo reativo fora de ponta (kVarh):** Tarifa de energia reativa, proporcional ao montante de energia reativa mensal apurada no horário fora de ponta;
- **Consumo reativo na ponta (kVarh):** Tarifa de energia reativa, proporcional ao montante de energia reativa mensal apurada no horário de ponta;
- **Demanda (kW):** Maior demanda apurada no ciclo de faturamento, com uma integralização de 15 minutos. Válido somente para consumidores que optaram pela tarifa horo-sazonal verde;
- **Demanda fora de ponta (kW):** Maior demanda apurada no ciclo de faturamento, com uma integralização de 15 minutos, considerando o horário fora de ponta. Válido somente para consumidores que optaram pela tarifa horo-sazonal azul;
- **Demanda na ponta (kW):** Maior demanda apurada no ciclo de faturamento, com uma integralização de 15 minutos, considerando o horário de ponta. Válido somente para consumidores que optaram pela tarifa horo-sazonal azul.

Para cada uma dessas grandezas é definido um valor de tarifa, e o valor cobrado será a multiplicação desta tarifa pelo valor aferido, no ciclo de faturamento, para cada uma destas grandezas. Ao final, é realizado um somatório, já incluindo demais impostos e taxas, e então esse será o valor efetivo da fatura de energia para o ciclo de faturamento em questão. Ciclo de faturamento se refere ao período entre duas leituras do medidor de energia da concessionária, normalmente coincidindo com um determinado mês, podendo ocorrer pequenas variações de alguns dias para mais ou para menos.

Ainda, conforme a ANEEL, o consumidor do GRUPO A deve definir no ato da celebração do contrato de fornecimento de energia qual a sua modalidade tarifária horo-sazonal, sendo possível a escolha entre tarifa horo-sazonal verde ou tarifa horo-sazonal azul. Além da tarifa horo-sazonal, o consumidor também deve

definir a demanda a ser contratada, sendo ela única para consumidores que optaram pela tarifa horo-sazonal verde. Já para consumidores que optaram pela tarifa horo-sazonal azul, devem ser definidos dois valores de demanda a ser contratada: um para o horário de ponta e outro para o horário fora de ponta. Uma vez celebrado o contrato de fornecimento de energia, tanto a tarifa horo-sazonal quanto o valor de demanda contratada possuem um período de teste, que durará três meses, para que o consumidor confirme se os valores contratados foram as ideias. Após esse período, o consumidor só poderá alterar a demanda contratada ou a modalidade tarifária após um período de 12 meses.

Um aspecto importante a ser observado é a forma com que a demanda é faturada. Conforme mencionado, no ato da celebração do contrato o consumidor deve informar um valor de demanda a ser contratada. A cada ciclo de faturamento, o valor da demanda apurada através do medidor de energia é comparado com o valor da demanda contratada pelo consumidor. A partir desta comparação, surgem três cenários possíveis, com sua consequente forma de faturamento:

1. Demanda apurada inferior a 100% demanda contratada: Neste caso o cálculo do valor a ser pago da tarifa de demanda será realizado utilizando-se o valor da demanda contratada, mesmo que a demanda real apurada seja inferior;

2. Demanda apurada entre 100% e 105% da demanda contratada: Neste caso o cálculo do valor a ser pago da tarifa de demanda será realizado utilizando-se o valor da demanda real apurada;

3. Demanda apurada maior do que 105% da demanda contratada: Neste caso o cálculo do valor a ser pago da tarifa de demanda será realizado em duas parcelas. Na primeira parcela, o cálculo do valor será realizado utilizando-se o valor da demanda real apurada. Na segunda parcela, o cálculo do valor será realizado utilizando-se a diferença entre o valor da demanda contratada e o valor da demanda apurada. A tarifa aplicada sobre a segunda parcela será o dobro da tarifa original. Por fim, as duas parcelas do cálculo entram para o somatório do valor total da tarifa.

Este cálculo tarifário da demanda, no caso de o consumidor ter optado pela modalidade tarifária azul, será replicado tanto para a demanda no horário de ponta quanto para a demanda fora de ponta.

A respeito da demanda, de forma a sintetizar a metodologia de tarifação, pode-se afirmar que para o consumidor o ideal é que a sua demanda contratada seja o mais próximo possível da demanda real pois, caso esta fique abaixo, significa que a demanda contratada poderia ser menor, ocasionando em um menor valor de tarifa e, por outro lado, caso a demanda contratada fique muito abaixo do valor real apurado, será paga uma multa por esse valor excedente, que representa o triplo da tarifa normal sobre este valor que excedeu a demanda contratada.

OTIMIZAÇÃO

Conforme Vanderplaats (1984), citado por Maia (2009), otimização é a busca da melhor solução para uma operação, enquanto certas restrições são satisfeitas. Uma forma de realizar a otimização de um problema é atribuir parâmetros e verificar a solução. Este processo é repetido diversas vezes, analisando o resultado obtido e tentando melhorá-lo. Este processo é semelhante aos métodos de otimização, porém sem qualquer critério matemático. Basicamente trata-se de tentativa e erro. (MARCO, 2012).

Uma forma simples e rápida de resolver um problema utilizando métodos matemáticos de otimização é através da ferramenta Solver, do software Microsoft Excel. Através deste módulo, é possível resolver problemas de forma mais assertiva e rápida do que pela tentativa e erro, mesmo que não se conheça o embasamento matemático dos métodos de otimização numéricos.

Para utilizar esta ferramenta, basta que o usuário possua em seu computador o pacote Office, onde estará incluso o software Excel. A ferramenta Solver já estará disponível no software, bastando apenas que a mesma seja habilitada. A partir disso, a sua configuração é muito simples, bastando que o equacionamento seja montado, utilizando a metodologia padrão do Excel, e que então sejam definidas no Solver quais são as variáveis a serem controladas, qual é o resultado desejado e quais são as restrições da resolução. (MARCO, 2012).

Em uma situação real, todo o consumidor enquadrado no Grupo A de faturamento deve monitorar o perfil do seu consumo energético com o objetivo de manter os seus custos com energia os mais baixos possíveis. Uma forma simples e eficaz de realizar este monitoramento é através da análise das faturas de energia. Nas figuras 1 e 2 pode-se observar um exemplo de fatura de energia característica do consumidor do grupo A.



Descrição da operação Nº	Unid. Med.	Quant. Faturada	Tarifa ANEEL	Tarifa com tributos R\$	Valor total da operação R\$	Base Cálcl. ICMS	Aliq. ICMS %	ICMS	PIS 1,07 %	COFINS 4,94 %		Tributo	Base de Cálcl. (R\$)	Alíquota (%)	Valor (R\$)
Consumo Ponta [kWh] - TUSD 6.00% ABR/22	kWh	210.0000	1,07454000	1,43285715	300,90	300,90	25,00	75,23	2,41	11,15		ICMS	4.509,40	25,00	1.127,35
Consumo Fora Ponta [kWh]-TUSD 6.00% ABR/22	kWh	2.374.5600	0,08670000	0,11560879	274,52	274,52	25,00	68,83	2,20	10,17		PIS/PASEP	23.313,47	1,07	249,40
Cosa Ponta - TE 6.00% ABR/22	kWh	210.0000	0,43789000	0,58380963	122,60	122,60	25,00	30,65	0,98	4,54		COFINS	23.313,47	4,94	1.151,81
Cosa FPonta TE 6.00% ABR/22	kWh	2.374.5600	0,27069000	0,36092161	857,03	857,03	25,00	214,26	6,88	31,75					
Demanda [kW] - TUSD 6.00% ABR/22	kW	689.2400	27,18000000	27,18289711	18.735,54				200,47	925,54					
Demanda [kW] - TUSD 6.00% ABR/22	kW	5.7600	27,18000000	36,24305556	208,76	208,76	25,00	52,19	1,68	7,73					
												Grandezas contratadas			
												Demanda kW		695	

Figura 3: Detalhe da fatura, constando tarifas aplicáveis, cálculos e demanda contratada

Consumo / kWh	Consumo Ponta - [kWh]		Nº DIAS FAT	Consumo / kWh	Consumo Fora de Ponta - [kWh]		Nº DIAS FAT	Demanda / kW	Demanda - [kW]		Nº DIAS FAT
	ABR 22	210,00	30		ABR 22	2374,00	30		ABR 22	5,00	30
	MAR 22	32043,00	31		MAR 22	323909,00	31		MAR 22	722,00	31
	FEV 22	36488,00	28		FEV 22	388439,00	28		FEV 22	728,00	28
	JAN 22	38671,00	31		JAN 22	411384,00	31		JAN 22	722,00	31
	DEZ 21	45119,00	31		DEZ 21	448609,00	31		DEZ 21	728,00	31
	NOV 21	17962,00	30		NOV 21	174744,00	30		NOV 21	731,00	30
	OUT 21	463,00	31		OUT 21	5144,00	31		OUT 21	9,00	31
	SET 21	4297,00	30		SET 21	68852,00	30		SET 21	343,00	30
	AGO 21	11897,00	31		AGO 21	119486,00	31		AGO 21	347,00	31
	JUL 21	1458,00	31		JUL 21	22822,00	31		JUL 21	347,00	31
	JUN 21	4553,00	30		JUN 21	85291,00	30		JUN 21	732,00	30
	MAI 21	28359,00	31		MAI 21	261716,00	31		MAI 21	733,00	31
ABR 21	32663,00	30	ABR 21	366332,00	30	ABR 21	734,00	30			

Figura 4: Detalhe da fatura, constando histórico das grandezas elétricas apuradas

Nos campos apresentados na figura 3, é possível obter o histórico dos últimos 13 meses dos consumos e demandas apurados no horário de ponta e no horário fora de ponta. No caso de consumidor da tarifa horo-sazonal verde, como é o caso do exemplo supracitado, a demanda apurada é única e integralizada, tanto para o horário de ponta quanto para o horário fora de ponta. Já nos campos da figura 4, é possível obter os valores das tarifas praticadas, já com o valor dos impostos embutidos, bem como o valor da demanda atual contratada.

Uma das técnicas para se projetar o consumo futuro de um local é a partir do histórico de consumo. Com dos dados obtidos na fatura, pode-se verificar o comportamento do local de consumo no último ano e então, supondo-se que não exista previsão de aumentos ou reduções de cargas instaladas no próximo ano, utilizar este comportamento como base para a readequação contratual da tarifa horo-sazonal e da demanda contratada. Para realizar esta análise, é necessário calcular o custo dos últimos doze ciclos de faturamento, conforme equação 1.

$$C_t = \sum_{n=1}^{12} C_n \quad \text{equação (1)}$$

Sendo:

C_t = Custo total anual;

C_n = Custo da fatura do ciclo de faturamento;

O custo da fatura de cada ciclo de faturamento de consumidor optante da tarifa verde será dado pela equação 2.

$$C_n = C_{\text{ponta}} \cdot (t_{\text{usd_ponta}} + t_{\text{e_ponta}}) + C_{\text{f/ponta}} \cdot (t_{\text{usd_f/ponta}} + t_{\text{e_f/ponta}}) + D \cdot t_D + D_{\text{ultr}} \cdot t_D \cdot 3 \quad \text{equação (2)}$$

Já o custo da fatura de cada ciclo de faturamento de consumidor optante da tarifa azul será dado pela equação 3.

$$C_n = C_{\text{ponta}} \cdot (t_{\text{usd_ponta}} + t_{\text{e_ponta}}) + C_{\text{f/ponta}} \cdot (t_{\text{usd_f/ponta}} + t_{\text{e_f/ponta}}) + D_{\text{ponta}} \cdot t_{D_ponta} + D_{\text{f/ponta}} \cdot t_{D_f/ponta} + D_{\text{ultr_ponta}} \cdot t_{D_ponta} \cdot 3 + D_{\text{ultr_f/ponta}} \cdot t_{D_f/ponta} \cdot 3 \quad \text{equação (3)}$$

Sendo:

$t_{\text{usd_ponta}}$ = Tarifa referente ao uso do sistema de distribuição no horário de ponta;

$t_{\text{usd_f/ponta}}$ = Tarifa referente ao uso do sistema de distribuição no horário fora de ponta;

$t_{\text{e_ponta}}$ = Tarifa referente ao consumo de energia no horário de ponta;

$t_{\text{e_f/ponta}}$ = Tarifa referente ao consumo de energia no horário fora de ponta;

t_D = Tarifa referente à demanda;

t_{D_ponta} = Tarifa referente à demanda no horário de ponta;

$t_{D_f/ponta}$ = Tarifa referente à demanda no horário fora de ponta;

C_{ponta} = Consumo no horário de ponta no ciclo de faturamento, em kWh;

$C_{\text{f/ponta}}$ = Consumo no horário fora de ponta no ciclo de faturamento, em kWh;

D = Demanda apurada ou demanda contratada, dependendo de qual for maior, em kW;

D_{ponta} = Demanda apurada ou demanda contratada, dependendo de qual for maior, no horário de ponta, em kW;

$D_{f/ponta}$ = Demanda apurada ou demanda contratada, dependendo de qual for maior, no horário fora de ponta, em kW;

D_{ultr} = Demanda apurada que excedeu a demanda contratada, em kW;

D_{ultr_ponta} = Demanda apurada que excedeu a demanda contratada, no horário fora de ponta, em kW;

$D_{ultr_f/ponta}$ = Demanda apurada que excedeu a demanda contratada, no horário fora de ponta, em kW;

Ao se efetuar o cálculo, é necessário se atentar para os valores de demanda (D , D_{ponta} e $D_{f/ponta}$), que podem assumir o valor da demanda contratada ou da demanda apurada, dependendo de qual for a maior. A demanda de ultrapassagem só será considerada se a demanda apurada for superior à 105% da demanda contratada.

Esta análise torna-se relativamente simples quando o comportamento do local é estático em termos de consumo e demanda de energia, já que basta que seja definida uma demanda contratada próxima da demanda apurada e calcular os cenários para faturamento na tarifa azul e na tarifa verde para se obter os valores mais vantajosos. Porém, em casos onde o comportamento não é estático, como no exemplo da fatura das figuras 1 e 2, esta análise torna-se complexa, já que um mesmo valor de demanda pode ser vantajoso em um ciclo de demanda, porém deixar de ser vantajoso nos próximos. O mesmo vale para a tarifa horo-sazonal verde ou azul.

Sendo assim, em casos onde o comportamento do local não é estático, são necessárias várias iterações das equações de tarifa, alternando-se valores de demanda contratada e tarifa horo-sazonal, para se obter os parâmetros de contratação mais vantajosos, de acordo com os dados históricos do local. Este fato torna o processo, se feito de maneira manual, bastante trabalhoso e sem garantias de que os melhores parâmetros foram definidos. Neste contexto, torna-se interessante a utilização das técnicas de otimização através da ferramenta *Solver*, do *MS Excel*.

RESULTADOS OBTIDOS

Como demonstração do uso da ferramenta *Solver*, do *MS Excel*, considera-se como base a fatura do subitem anterior. Neste caso, o primeiro passo é extrair os valores do histórico da fatura. Os dados extraídos são mostrados na tabela 1.

Tabela 1: Valores do histórico de consumo extraídas da fatura de energia

	C_{ponta}	$C_{f/ponta}$	$D_{apurada}$	$D_{contratada}$	Tarifa
mar/22	32043	323909	722	695	verde
fev/22	36488	388439	728	695	verde
jan/22	38671	411384	722	695	verde
dez/21	45119	448609	728	695	verde
nov/21	17962	174744	731	695	verde
out/21	463	5144	9	695	verde
set/21	4297	68852	343	695	verde
ago/21	11897	119486	347	695	verde
jul/21	1458	22822	347	695	verde
jun/21	4553	85291	732	695	verde
mai/21	28359	261716	733	695	verde
abr/21	32663	366332	734	695	verde

A partir destes dados, é possível se obter o valor pago aproximado de cada ciclo de faturamento. Para isso, é necessário se obter os valores das tarifas da concessionária, e então realizar o equacionamento da tarifa, levando-se em conta a metodologia apresentada no capítulo anterior. Os valores das tarifas, sem os impostos, podem ser obtidos no sítio da própria concessionária, e são mostrados nas figuras 5 e 6.

Sub Grupo	TUSD			TE (R\$/MWh)									Ultrapassagem(R\$/KW)	
	Ponta R\$ KW	Fora R\$ KW	Ponta R\$ MWh	TE	Ponta			TE	Fora Ponta			Ponta	Fora Ponta	
					Bandeira Verde	Bandeira Amarela	Bandeira Vermelha		Bandeira Verde	Bandeira Amarela	Bandeira Vermelha			
A1 (230 kV ou mais) - GMB	3,89	4,31	55,56	437,86	437,86	456,60	579,86	270,66	270,66	289,40	412,66	7,78	8,62	
A1 (230 kV ou mais) - VIPAL	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
A2 (88 a 138 kV)	9,30	9,11	60,21	437,86	437,86	456,60	579,86	270,66	270,66	289,40	412,66	18,60	18,22	
A3 (69 kV)	14,94	12,61	62,19	437,86	437,86	456,60	579,86	270,66	270,66	289,40	412,66	29,88	25,22	
A3a (30 a 44 kV)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
A4 (2,3 a 25 kV)	40,57	27,18	86,70	437,86	437,86	456,60	579,86	270,66	270,66	289,40	412,66	81,14	54,36	

Figuras 5: Valores de tarifa da concessionária de energia RGE, referentes a tarifa azul.

Sub Grupo	TUSD			TE (R\$/MWh)									Ultrapassagem (R\$/KW)	
	R\$ KW	Ponta	Fora Ponta	R\$ MWh	TE	Ponta			TE	Fora Ponta			Ponta	Fora Ponta
						Bandeira Verde	Bandeira Amarela	Bandeira Vermelha		Bandeira Verde	Bandeira Amarela	Bandeira Vermelha		
A3a (30 a 44 kV)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A4 (2,3 a 25 kV)	27,18	1074,54	86,70	437,86	437,86	456,60	579,86	270,66	270,66	289,40	412,66		54,36	

Figuras 6: Valores de tarifa da concessionária de energia RGE, referentes a tarifa verde.

Na situação em questão, trata-se de consumidor do subgrupo “A3”. Nas tabelas 2 e 3, são apresentados os valores das tarifas do subgrupo A3, já com a incidência dos impostos cabíveis.

Tabela 2: Tarifa verde, já com a incidência de impostos.

Tarifa Verde	t _{usd_ponta}	R\$ 1,4351
	t _{usd_f/ponta}	R\$ 0,1154
	t _{e_ponta}	R\$ 0,5797
	t _{e_f/ponta}	R\$ 0,3615
	D	R\$ 36,2438
	D _{ultr}	R\$ 72,4876

Tabela 3: Tarifa azul, já com a incidência de impostos.

Tarifa Azul	t _{usd_ponta}	R\$ 0,1156
	t _{usd_f/ponta}	R\$ 0,1156
	t _{e_ponta}	R\$ 0,5839
	t _{e_f/ponta}	R\$ 0,3609
	D _{ponta}	R\$ 54,0990
	D _{f/ponta}	R\$ 36,2435
	D _{ultr_f/ponta}	R\$ 77,1129
	D _{ultr_ponta}	R\$ 115,1036

Resta agora criar o equacionamento para o cálculo da tarifa. Devido ao fato de existirem situações lógicas no equacionamento, como por exemplo a consideração do tipo de tarifa e qual valor de demanda será utilizado (apurada ou contratada), foi utilizado a função “SE()” do Excel, que permite a execução de testes lógicos. Os valores obtidos são apresentados na tabela 4.

Tabela 4: Valores calculados para cada ciclo de faturamento, baseado no histórico.

	Custo fatura
mar/22	R\$ 245.194,61
fev/22	R\$ 285.140,96
jan/22	R\$ 300.263,86
dez/21	R\$ 331.224,81
nov/21	R\$ 148.625,90

out/21	R\$	28.575,37
set/21	R\$	66.681,20
ago/21	R\$	106.140,24
jul/21	R\$	39.010,38
jun/21	R\$	79.059,45
mai/21	R\$	211.266,70
abr/21	R\$	269.936,33
Total anual:	R\$	2.111.119,81

O próximo passo é iniciar a utilização do Solver para obter os melhores valores de demandas contratadas e tipo de tarifa. O objetivo desta otimização será a redução do custo anual com energia elétrica neste local. Na figura 7 é apresentada a tela inicial da ferramenta *solver*.

Inicialmente, deve-se informar qual é o objetivo. Isso é feito através do campo “Definir Objetivo”, onde é inserida a célula onde se encontra o valor a ser otimizado. No caso em questão, a célula “C17” é onde está localizado o valor anual das faturas. Logo abaixo, é definido o que se deseja obter desta variável otimizada. No caso do exemplo, deseja-se que a variável seja a menor possível, portanto, deve-se marcar o *radiobutton* “Mín”.

A seguir, são definidas quais variáveis serão alteradas para se atingir o objetivo. No caso do exemplo, serão alteradas três variáveis: demanda contratada de ponta, demanda contratada fora de ponta e tipo de tarifa. Esta seleção é feita no campo “Alternando células Variáveis:”. Foram selecionadas as células “C5”, “C6” e “I1”, sendo as duas primeiras relativas às demandas contratadas e a última referente ao tipo de fatura. Para fins de cálculo, a variável “Demanda contratada fora de ponta” que incide na tarifa azul, pode ser considerada como a mesma variável “Demanda contratada” no caso da tarifa verde.

A seguir são definidas as restrições. Para as variáveis de demanda foi definido uma faixa genérica entre 30kW e 1500kW. O limite mínimo foi estipulado em 30 kW, pois não é permitida a contratação de demandas abaixo deste valor. O limite de 1500 kW foi definido pois não é usual que consumidores possuam demandas acima destes valores, porém este valor pode ser ajustado conforme a necessidade. Desta forma, a mesma configuração pode ser usada para diferentes cenários. Isso se torna especialmente interessante quando um gestor necessita controlar os parâmetros de diversas instalações consumidoras. Outra restrição inserida para as variáveis de demanda é defini-las como números inteiros, já que não é possível a contratação de demanda fracionada. Já para a variável de tipo de tarifa, a única restrição imposta é a definição que ela será uma variável do tipo binária, já que só pode assumir dois valores: verde ou azul.

Parâmetros do Solver

Definir Objetivo: ↑

Para: ☐ Máx. ☒ Mín. ☐ Valor de:

Alterando Células Variáveis: ↑

Sujeito às Restrições:

\$C\$5:\$C\$6 <= 1500	Adicionar Alterar Excluir Redefinir Tudo Carregar/Salvar
\$C\$5:\$C\$6 = número inteiro	
\$C\$5:\$C\$6 >= 30	
\$I\$1 = binário	

☒ Tornar Variáveis Irrestritas Não Negativas

Selecionar um Método de Solução: ↓

Método de Solução

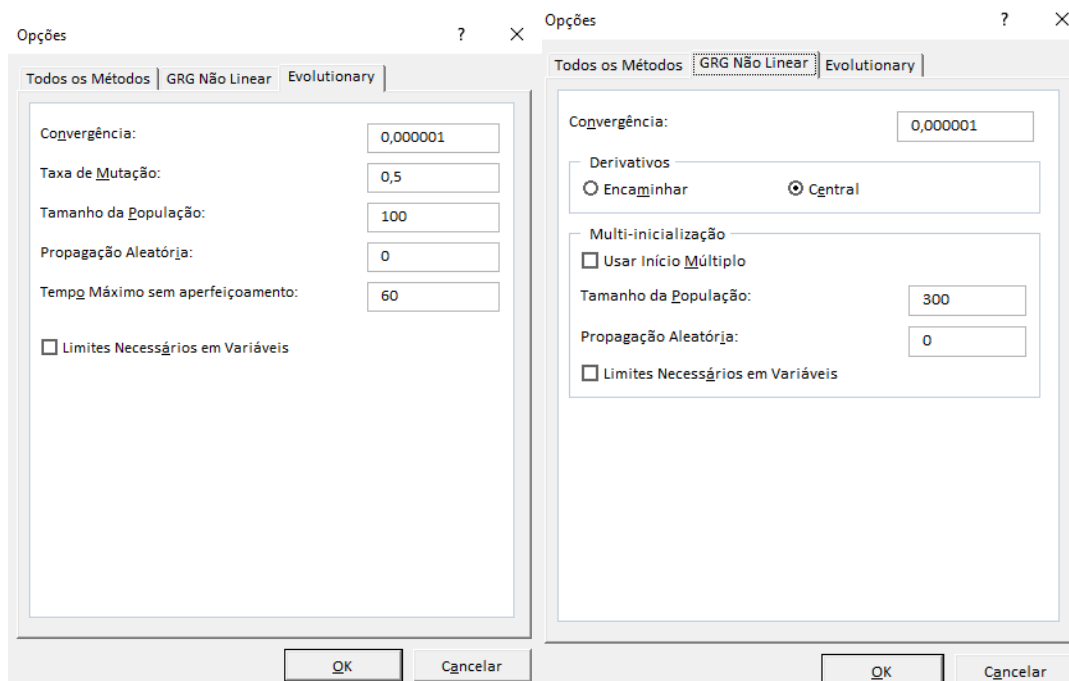
Selecione o mecanismo GRG Não Linear para Problemas do Solver suaves e não lineares. Selecione o mecanismo LP Simplex para Problemas do Solver lineares. Selecione o mecanismo Evolutionary para problemas do Solver não suaves.

Figuras 7: Tela inicial da ferramenta Solver, do Microsoft Excel.

A seguir são definidas as restrições. Para as variáveis de demanda foi definido uma faixa genérica entre 30kW e 1500kW. O limite mínimo foi estipulado em 30 kW, pois não é permitida a contratação de demandas abaixo deste valor. O limite de 1500 kW foi definido pois não é usual que consumidores possuam demandas acima destes valores, porém este valor pode ser ajustado conforme a necessidade. Desta forma, a mesma configuração pode ser usada para diferentes cenários. Isso se torna especialmente interessante quando um gestor necessita controlar os parâmetros de diversas instalações consumidoras. Outra restrição inserida para as variáveis de demanda é defini-las como números inteiros, já que não é possível a contratação de demanda fracionada. Já para a variável de tipo de tarifa, a única restrição imposta é a definição que ela será uma variável do tipo binária, já que só pode assumir dois valores: verde ou azul.

Por fim, resta definir qual o método de solução, definir as opções de cada método, e executar a ferramenta. Para fins de avaliação, foram tentados os três métodos disponíveis no Solver: GRG não linear, LP *Simplex* e *Evolutionary*.

Os parâmetros foram definidos de forma empírica, através de algumas tentativas. Os parâmetros finais, para cada método, podem ser vistos na figura 8.



Figuras 8: Tela de configuração dos métodos de otimização.

Após definidos os parâmetros dos métodos, o solver foi executado. Dos três métodos, apenas o LP *Simplex* não conseguiu encontrar solução para o problema, pois as condições de linearidade do método não foram atendidas. Já os métodos GRG Não Linear e *Evolutionary* convergiram para os mesmos valores ótimos das variáveis, sendo que o método GRG Não Linear obteve vantagem quanto ao tempo de execução, que foi praticamente instantâneo. Já no método *Evolutinary* o tempo para convergir à um resultado foi de aproximadamente 60 segundos. O resultado ótimo encontrado pelos dois métodos é manter a tarifa como sendo verde, e a demanda contratada sendo alterada para 700 kW. Na tabela 5 é comparado os valores originais das faturas com os valores otimizados pelo Solver.

Tabela 5: Comparação dos valores de cada ciclo de faturamento, antes e depois da otimização.

	Custo original		Custo otimizado		Diferença
mar/22	R\$	245.194,61	R\$	245.194,61	R\$ -
fev/22	R\$	285.140,96	R\$	285.140,96	R\$ -
jan/22	R\$	300.263,86	R\$	300.263,86	R\$ -
dez/21	R\$	331.224,81	R\$	331.224,81	R\$ -
nov/21	R\$	148.625,90	R\$	146.016,35	R\$ 2.609,55
out/21	R\$	28.575,37	R\$	28.756,59	-R\$ 181,22
set/21	R\$	66.681,20	R\$	66.862,42	-R\$ 181,22
ago/21	R\$	106.140,24	R\$	106.321,46	-R\$ 181,22
jul/21	R\$	39.010,38	R\$	39.191,60	-R\$ 181,22
jun/21	R\$	79.059,45	R\$	76.377,41	R\$ 2.682,04
mai/21	R\$	211.266,70	R\$	208.512,17	R\$ 2.754,53
abr/21	R\$	269.936,33	R\$	267.109,31	R\$ 2.827,02
Total anual:	R\$	2.111.119,81	R\$	2.100.971,54	R\$ 10.148,26

Com o objetivo de verificar se o modelamento pode ser aplicado de forma genérica, foram executadas outra três análises, utilizando faturas de energia de outros locais. A tabela 6 apresenta o segundo exemplo de análise, onde inicialmente o local estava enquadrado no modelo tarifário horo-sazonal verde e com uma demanda

contratada de 1050 kW. Após a otimização, verificou-se que o modelo tarifário horo-sazonal ideal seria o azul e com uma demanda contratada de 1077 kW na ponta e 1100 kW fora da ponta.

Tabela 6: Segundo exemplo de comparação dos valores de cada ciclo de faturamento, antes e depois da otimização.

	Custo original	Custo otimizado	Diferença
mar/22	R\$ 503.530,33	R\$ 475.726,52	R\$ 27.803,81
fev/22	R\$ 446.555,01	R\$ 437.906,06	R\$ 8.648,95
jan/22	R\$ 508.791,42	R\$ 482.029,43	R\$ 26.761,99
dez/21	R\$ 474.504,58	R\$ 443.929,85	R\$ 30.574,73
nov/21	R\$ 190.528,64	R\$ 156.908,92	R\$ 33.619,72
out/21	R\$ 556.265,05	R\$ 514.630,36	R\$ 41.634,69
set/21	R\$ 202.282,39	R\$ 176.367,12	R\$ 25.915,27
ago/21	R\$ 454.582,16	R\$ 437.995,45	R\$ 16.586,71
jul/21	R\$ 456.928,78	R\$ 435.572,63	R\$ 21.356,16
jun/21	R\$ 516.242,40	R\$ 483.069,48	R\$ 33.172,92
mai/21	R\$ 525.039,19	R\$ 491.062,91	R\$ 33.976,28
abr/21	R\$ 504.830,05	R\$ 475.243,19	R\$ 29.586,86
Total anual:	R\$ 5.340.080,02	R\$ 5.010.441,93	R\$ 329.638,09

A tabela 7 apresenta o terceiro exemplo de análise, onde inicialmente o local estava enquadrado no modelo tarifário horo-sazonal azul e com uma demanda contratada de 940 kW, tanto na ponta, quanto fora da ponta. Após a otimização, verificou-se que o modelo tarifário horo-sazonal ideal seria o azul e com uma demanda contratada de 831 kW na ponta e 840 kW fora da ponta.

Tabela 7: Terceiro exemplo de comparação dos valores de cada ciclo de faturamento, antes e depois da otimização.

	Custo original	Custo otimizado	Diferença
mar/22	R\$ 377.500,47	R\$ 370.435,36	R\$ 7.065,11
fev/22	R\$ 384.310,90	R\$ 377.716,43	R\$ 6.594,47
jan/22	R\$ 357.433,54	R\$ 350.206,13	R\$ 7.227,40
dez/21	R\$ 383.677,36	R\$ 377.824,01	R\$ 5.853,34
nov/21	R\$ 381.700,71	R\$ 373.299,39	R\$ 8.401,32
out/21	R\$ 365.595,82	R\$ 358.730,86	R\$ 6.864,97
set/21	R\$ 372.201,17	R\$ 363.383,31	R\$ 8.817,86
ago/21	R\$ 371.549,56	R\$ 364.051,66	R\$ 7.497,90
jul/21	R\$ 398.417,08	R\$ 401.908,65	-R\$ 3.491,57
jun/21	R\$ 384.954,14	R\$ 378.305,57	R\$ 6.648,57
mai/21	R\$ 355.056,34	R\$ 345.535,19	R\$ 9.521,15
abr/21	R\$ 361.999,45	R\$ 352.478,30	R\$ 9.521,15
Total anual:	R\$ 4.494.396,53	R\$ 4.413.874,86	R\$ 80.521,67

Já a tabela 8 apresenta o quarto exemplo de análise, onde inicialmente o local estava enquadrado no modelo tarifário horo-sazonal verde e com uma demanda contratada de 204 kW. Após a otimização, verificou-se que o modelo tarifário horo-sazonal ideal seria o azul e com uma demanda contratada de 213 kW tanto na ponta, quanto fora da ponta.

Tabela 8: Quarto exemplo de comparação dos valores de cada ciclo de faturamento, antes e depois da otimização.

	Custo original	Custo otimizado	Diferença
mar/22	R\$ 81.860,28	R\$ 84.009,73	-R\$ 2.149,46
fev/22	R\$ 78.448,33	R\$ 79.456,86	-R\$ 1.008,52
jan/22	R\$ 86.610,42	R\$ 84.027,89	R\$ 2.582,53
dez/21	R\$ 81.508,57	R\$ 79.823,03	R\$ 1.685,54
nov/21	R\$ 89.438,53	R\$ 86.949,10	R\$ 2.489,43
out/21	R\$ 88.629,50	R\$ 85.701,24	R\$ 2.928,25
set/21	R\$ 75.675,55	R\$ 77.193,77	-R\$ 1.518,22
ago/21	R\$ 77.492,17	R\$ 77.519,62	-R\$ 27,45
jul/21	R\$ 75.400,94	R\$ 75.093,67	R\$ 307,27
jun/21	R\$ 75.247,46	R\$ 75.345,67	-R\$ 98,21
mai/21	R\$ 76.699,58	R\$ 76.720,52	-R\$ 20,94
abr/21	R\$ 82.376,00	R\$ 79.585,44	R\$ 2.790,56
Total anual:	R\$ 969.387,33	R\$ 961.426,55	R\$ 7.960,78

A Tabela 9 sintetiza os resultados obtidos para os exemplos analisados. Observa-se que invariavelmente foi obtida uma redução nos custos a partir da otimização efetuada com o emprego da formulação desenvolvida. Essa economia, em média, foi superior a 2,31% em relação aos custos originais.

Tabela 9. Custos originais e otimizados para os exemplos analisados.

Exemplo	Custo original	Custo otimizado	Diferença	Economia (%)
1	R\$ 2.111.119,81	R\$ 2.100.971,54	R\$ 10.148,26	0,4807
2	R\$ 5.340.080,02	R\$ 5.010.441,93	R\$ 329.638,09	6,1729
3	R\$ 4.494.396,53	R\$ 4.413.874,86	R\$ 80.521,67	1,7856
4	R\$ 969.387,33	R\$ 961.426,55	R\$ 7.960,78	0,8212

Como pode ser observado, a partir da utilização da ferramenta de otimização *Solver*, foi possível obter os parâmetros ideais de contratação para se obter o menor valor anual de gasto com energia para os exemplos trazidos. Por mais que, em alguns exemplos, alguns ciclos de faturamento obtiveram um resultado pior, no somatório do ano houve um ganho financeiro em todos os exemplos. Isso se deve ao fato de que em alguns ciclos dos exemplos trazidos ocorre uma variação nos valores de demandas e consumos aferidos, sendo às vezes para mais ou para menos, o que ocasiona em um valor de fatura maior ou menor, dependendo dos valores de demandas contratadas e do regime horo-sazonal definido. Sendo assim, alguns ciclos podem apresentar valores piores após a otimização, pois o processo busca a otimização da somatória anual dos custos, e não do custo isolado do ciclo. Desta forma, pode-se concluir que os parâmetros obtidos com a otimização buscam ampliar a economia em alguns ciclos, mesmo que isso acarrete em prejuízo em outros ciclos, já que na somatória anual, o custo se mantém abaixo do custo original.

CONCLUSÕES

O problema proposto neste artigo é um problema comum de todo gestor de contratos de energia. A análise de recontração anual de demanda e tipo de tarifa é de difícil assertividade, já que dificilmente se sabe como o consumo do local se comportará no ano subsequente. Quando não se tem uma previsibilidade nítida, e não exista previsão de alterações nas cargas e mudanças no comportamento de consumo, uma boa estratégia é avaliar o histórico do último ano de consumo, e a partir de aí definir qual são os melhores parâmetros de contratação.

Esta análise, normalmente, é feita manualmente, com base em tentativa e erro. A assertividade deste método está diretamente ligada a experiência do gestor, que definirá os possíveis melhores parâmetros para iniciar a análise, e a partir daí, refinar o resultado.

Com o uso da ferramenta Solver, do MS Excel, esta análise se torna mais assertiva e menos dependente da experiência do gestor dos contratos de energia. Através da inserção dos dados históricos, em poucos segundos é possível obter os melhores valores para os parâmetros de contratação. A utilização deste método pode tornar o trabalho de readequação tarifária mais ágil e trazer um possível ganho com economia de custos com energia.

O método proposto neste artigo torna-se especialmente interessante para organizações que possuam várias unidades consumidoras, como por exemplo, companhias de saneamento, que possuem diversos pontos de bombeamento de água e esgoto. Normalmente estes locais são faturados em alta tensão, e tem seus comportamentos de consumo de difícil previsão. A utilização deste método economiza tempo do gestor destes inúmeros contratos de energia, além de trazer um provável ganho financeiro através da economia de custos com energia elétrica em todos estes pontos de consumo, proporcionando uma utilização ainda mais eficiente dos recursos e da infraestrutura instalada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST- Módulo 11. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_prodist_modulo_11_v2.pdf>. Acessado em 10/06/2022.
2. ANEEL. Resolução Normativa Aneel nº 1000, de 7 de dezembro de 2021. Disponível em <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>>. Acessado em 10/06/2022.
3. ANEEL. Resolução Normativa Aneel nº 1003, de 1 de fevereiro de 2022. Disponível em <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20221003.pdf>>. Acessado em 10/06/2022.
4. MAIA, J. P. R. Otimização estrutural: estudo e aplicações em problemas clássicos de vigas utilizando a ferramenta Solver. 2009. 83 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2009.
5. MARCO, A. R. S. Otimização de Projetos Utilizando GRG, Solver e Excel. 2012. XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Belém – PA, 2012.
6. VANDERPLAATS, G. N. (1984). *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications*. EUA: McGraw-Hill.