

# CAIXEIRO VIAJANTE: APLICAÇÃO DA MODELAGEM MATEMÁTICA NA OTIMIZAÇÃO DE ROTAS EM UMA CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA ELÉTRICA

Ivanilda Agostinho Ferreira (UFPB) E-mail i\_ivanilda@hotmail.com

Elizama Rosa de Lima (UFPB) E-mail elizamarosalima@gmail.com

## Resumo

Este artigo apresenta um estudo de caso em uma concessionária de distribuição de energia elétrica brasileira com o objetivo de realizar uma aplicação sobre o Problema do Caixeiro Viajante (PCV). Visando otimizar as rotas das equipes de manutenção de subestações através da disponibilização de coordenadas do Google Maps das respectivas unidades consumidoras (UC) das subestações de um determinado estado. Essa otimização de rotas foi modelada utilizando o Problema do Caixeiro Viajante (PCV), juntamente com o *Visual Basic for Applications (VBA)* e o UFFLP integrado ao *Microsoft Excel 2007*. Com o intuito que as equipes de manutenção percorram o caminho de menor distância entre as possíveis subestações a serem visitadas, com a finalidade de executarem suas ordens de serviços. Desde que a equipe de manutenção, saísse primeiramente da sede da concessionária, percorresse as subestações estabelecidas e retornasse no final para a sede, sem existir a possibilidade de passar mais de uma vez na mesma subestação denominada de cliente, correspondendo assim, a melhor rota encontrada quando comparada com a sequência estabelecida inicialmente pela concessionária. Portanto, os gráficos e as figuras permitiram uma interpretação objetiva e notório sobre os dados e resultados dos indicadores de *performance*. Essa otimização contribui na redução do tempo gasto em deslocamentos, resultando em uma disponibilidade em mão de obra para executarem outras atividades. Influência também no aumento de indicadores de desempenho por equipe, além de diminuir os custos relacionados à manutenção dos veículos.

**Palavras-chave:** Problema do Caixeiro Viajante. Equipes de manutenção. UFFLP. *Visual Basic*. Rotas.

## 1. Introdução

A globalização confere impactos que resultam nas expansões de mercado em escala mundial, exigindo que as empresas busquem aperfeiçoar e gerenciar seus processos para almejar uma parcela significativa do mercado. Este cenário, requisita que as empresas forneçam serviços com qualidade aos seus clientes, ao mesmo tempo em que desenvolvam estratégias de economizar e superar os desafios do cotidiano. As empresas que utilizam veículos para prestar serviços possuem o deslocamento como uma atividade necessária ao seu processo interno.

Assim, a utilização de *softwares* e aplicativos integrados ao Google Maps são possibilidades de otimizar estas possíveis rotas. Porém, a aquisição ou desenvolvimento de *software* de roteamento de veículos torna-se caro, devido à disposição dos recursos financeiros de empresas. E na maioria das vezes não traduzem a totalidade da realidade dos processos da empresa. Para tanto, existe uma maneira acessível, mediante a utilização do Solver do *Microsoft Excel* para resolver problemas de programação linear.

O tempo de deslocamento das equipes influencia na disponibilidade para executar serviços que agregam valor ao processo de manutenção em subestações. Os deslocamentos desnecessários entre as subestações e a sede da concessionária de energia elétrica impactam na *performance* de indicadores, necessariamente na métrica produtividade. Quando as equipes se deslocam para campo, fazendo uso de um percurso longo, ao final do dia correm o risco de não cumprirem toda a sua respectiva programação de manutenção semanal recebida e originada no Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) anual. Este fato poderá acarretar na postergação das demais atividades da programação, sendo necessário possuir mais mão de obra para compor equipes, bem como geração de horas extras e gastos adicionais, uma vez que, existe uma vasta faixa de subestações a serem inspecionadas.

Como o deslocamento é contabilizado como uma métrica improdutiva, ou seja, quanto maior os valores gastos com deslocamentos, menor é a probabilidade de alcançar o indicador produtividade na concessionária. Portanto, este artigo mediante a implementação do modelo do problema do caixeiro viajante (PCV) visa minimizar distâncias percorridas pelas equipes.

## 2. Materiais e métodos

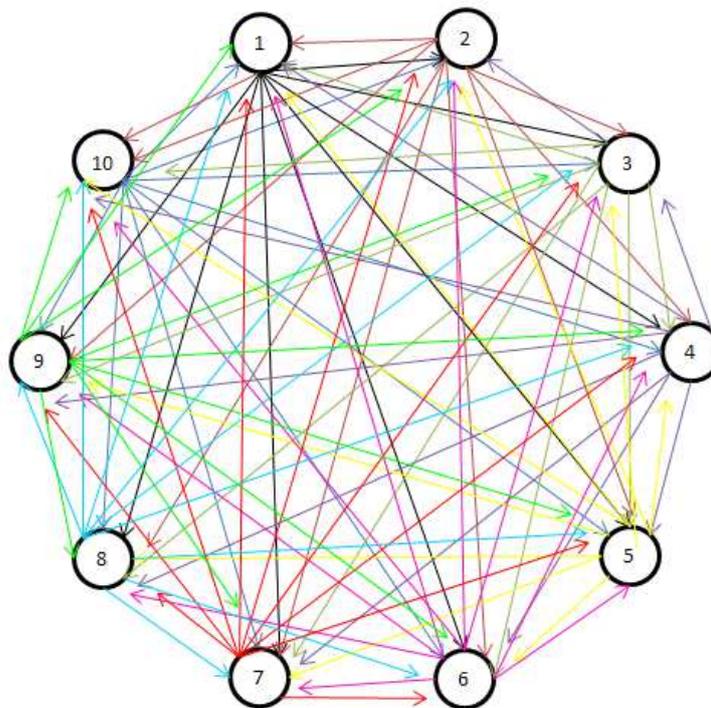
### 2.1 Problema do caixeiro viajante

O Problema do Caixeiro Viajante consiste em um problema onde existe um conjunto de cidades, um ponto de partida e um caixeiro. Esse caixeiro sai desse ponto de partida (sede) visita todas as cidades ou um subconjunto de cidades somente uma única vez e retorna ao ponto de partida visando otimizar determinada situação.

Segundo Arenales et. al. (2007) problemas de caixeiro viajante pertencem à classe de problemas de roteamento de nós, e são definidos em grafos orientados ou não orientados.

Os grafos são constituídos pela união de dois conjuntos  $(V,A)$ . Onde  $V$  é um conjunto não vazio que representa os vértices ou os nodos do grafo. E o conjunto  $A$  de pares ordenados representam as arestas do grafo. Exemplificando mediante a utilização da figura 01, considere o grafo  $G(c, A)$ , onde  $c$  é o conjunto de nós de  $G$ , que representam as 10 cidades e  $A$  o conjunto dos arcos de  $G$ , que representa a conexão entre cidades. Os arcos na figura 01 representam as possibilidades de rotas entre apenas 10 cidades escolhidas, ou seja, menor distância.

**Figura 01** - Grafo do problema com 10 nós.



**Fonte:** Autor (2019)

Assim, cada subconjunto de vértices deste grafo contém as  $n$  cidades consideradas, e os custos para a designação de cada par de cidades representam a distância Euclidiana ou o custo da viagem entre estas cidades (SIQUEIRA, 2005).

O problema do caixeiro viajante apresenta algumas variações com relação ao objetivo final de otimização, podendo ser distância, custos, e aquisição de produtos. Entretanto, o enfoque deste artigo está no problema mais clássico, que trata da minimização da distância percorrida entre as subestações de energia elétrica.

Segundo Caixeiro (2000) o problema do caixeiro é um clássico exemplo de problema de otimização combinatória. E consiste em descobrir a rota que torna mínima a viagem total.

De acordo com Lachtermacher (2007), representa um caso especial de problemas de redes, em que os arcos significam a distância entre dois pontos (nós). Quando desejamos achar a rota que une estes pontos com distância mínima entre as possíveis, teremos um problema do tipo do menor caminho. Este tipo de problema pode ser generalizado e aplicado à distribuição de energia, e entre outros.

Em problemas de menor caminho haverá sempre dois tipos de nós especiais chamados de origem e destino. A modelagem do problema terá variáveis binárias do tipo  $X_{ij}$  indicando o sentido da cidade  $i$  para a Cidade  $j$ . Se o valor da variável for igual a um, significa que aquele trecho deve ser percorrido. De forma inversa, se o valor da variável for igual à zero, a estrada que liga a cidade  $i$  à cidade  $j$  não deverá ser utilizada.

A função-objetivo visa minimizar a distância percorrida [...]; logo, se as variáveis de decisão assumem zero ou um, a multiplicação destas pelas distâncias entre as respectivas cidades será zero e igual à distância entre as cidades se esta for utilizada (LACHTERMACHER, 2007, p.143).

## **2.2 Roteamento de veículos**

Roteamento de veículos está interligado com a sua relevância, ou seja, é de grande importância para indústrias, e este último interfere na economia mundial. Nesse sentido, vale salientar que o estudo de Roteamento de Veículos se dá pela caracterização dos seus problemas meramente existentes. Com isso, é importante descrever alguns dos principais problemas que são encontrados no Roteamento de Veículos (MANGUINO, 2013).

Um dos principais problemas de Roteamento de Veículos é o VRP, conhecido como (Vehicle Routing Problem – VRP), tem como objetivo encontrar rotas, a partir de um ponto principal, ou armazém central, com veículos iguais, com menor custo possível para atender a demanda e principalmente as necessidades dos clientes (MANGUINO, 2013).

Porém, o VRP, não é o único problema existente, pois os autores Toth e Vigo (2002), apontam que os veículos para transporte de mercadorias enfrentam o principal problema de mudança de rota, pois os transportes de produtos é feito para atender as necessidades específicas dos clientes, e estes são caracterizados para tal fim, por isso o problema existente do veículo não retornar para o depósito original gera um problema com maior grau de ser solucionado.

Coelho (2010) aponta que existem outras variações de problemas, tais como o problema de Roteamento com janelas de tempo e Roteamento com múltiplos depósitos, no entanto, estes últimos representam boa parte das pesquisas e dos casos práticos utilizados.

Contudo, o autor anterior, relata que, assim como no Problema do Caixeiro Viajante, o roteamento de veículos também é solucionado através de heurísticas, os métodos “inteligentes” que geram boas soluções em um tempo reduzido. E isto está em concordância com o pensamento de Marque et al. (2005), que a solução dos problemas encontrados no Roteamento de Veículos depende do método proposto, de tal maneira a minimizar o tempo, custo, utilização de veículos, de formar a equilibrar todos estas opções durante toda operação logística.

Para Pisinger e Ropke (2007), levando em consideração todos os aspectos que tornam o problema de roteamento de veículos complicado de ser resolvido, é possível propor metas para solucionar o problema. A primeira refere-se em minimizar o custo de transporte global, que depende da distância global viajada, ou do tempo total viajado, além dos custos associados com os veículos usados para o transporte e o custo do motorista.

### **2.3 UFFLP e *Visual Basic Applications***

O UFFLP é definido como um conjunto de funções pertencentes a diversos *softwares*, cujo principal objetivo é resolver modelos de programação. Sua utilização se tornou popular pelo fato de estar disponível dentro das planilhas do *Microsoft Excel*, facilitando os tratamentos de dados de modelos matemáticos através das linguagens VBA (GAPSON, 2018).

O UFFLP foi criado para atender a demanda de profissionais que utilizam tais sistemas, incluindo os estudantes, engenheiros e professores. A UFFLP tem em seu conjunto diversas funções em C/C++ ou VBA que são manipuláveis, e com isso, UFFLP tem em seu suporte os resolvidores CPLEX e GUROBI, gratuitos para uso acadêmico, COIN CBC e CLPK, e com código de fonte aberto (GAPSON, 2018).

Em semelhança ao UFPLP, o *Visual Basic* é caracterizado por também ser um programa de linguagem de programação. Foi produzida pela Empresa *Microsoft* pertencente ao pacote *Microsoft Visual Basic*. O *Visual Basic* tem inúmeros recursos que possibilita a otimização de tarefas específicas, além do que permite a interação com outros *softwares* (AIOSA, 2011).

O uso de comandos VBA se faz necessário quando se almeja realizar tarefas complexas. Este comando será responsável por auxiliar o usuário na busca de valores em determinados locais da planilha do *Excel*, além de possibilitar a visualização da sequência de dados dispostos em dada linha e/ou coluna (PARANHOS, 2013).

## **2.4 Manutenção em subestações**

A manutenção é considerada uma prática habitual em muitas empresas e conferem-lhes confiabilidade e segurança em sistemas de máquinas para garantir sucesso em suas operações.

“Manutenção combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida” (NBR ISO-8402, 1994, p.6).

No caso do setor elétrico, a manutenção preventiva, preditiva e corretiva favorece a redução de interrupção de energia elétrica devido a falhas em linhas de transmissões, subestações de energia elétrica, componentes e equipamentos, impossibilitando o surgimento de multas de órgãos regulamentadores de energia.

## **3. Metodologia**

O presente artigo possui o objetivo de implementar o modelo do problema do caixeiro viajante (PCV) em um determinado setor específico de uma concessionárias de energia elétrica, com o intuito de propor rotas com menores distâncias possíveis, visualizando a minimização do deslocamento total.

Os dados foram coletados de forma quantitativa, utilizando as coordenadas latitude e longitude geográficas disponibilizadas pelo Google Maps. Depois foram convertidas de grau para o formato decimal, de 29 subestações incluindo a sede, considerada como ponto de origem e inseridas no GMaps para gerar a matriz de deslocamentos assimétrica.

A tabela 1 abaixo representa as coordenadas das cidades, incluindo a sede com a numeração representada pelo número 1.

**Tabela 1** - Coordenadas dos clientes

Cientes	Latitude	Longitude	Latitude decimal	Longitude decimal
1	7°10'02.30" S	34°52'37.52" W	-7,167307	-34,877092
2	7°05'13.70" S	34°51'00.18" W	-7,087140	-34,850053
3	7°30'48.19" S	34°53'22.82" W	-7,513386	-34,889675
4	7°01'38.08" S	34°50'23.65" W	-7,027246	-34,839903
5	7°15'43.93" S	34°56'14.01" W	-7,262204	-34,937227
6	7°07'05.44" S	34°52'01.97" W	-7,118178	-34,867217
7	7°14'23.83" S	34°55'45.81" W	-7,239954	-34,929394
8	7°13'17.06" S	35°01'53.10" W	-7,221408	-35,031418
9	6°59'04.47" S	35°02'10.18" W	-6,984575	-35,036161
10	7°29'34.67" S	35°02'16.20" W	-7,492965	-35,037836
11	7°10'49.62" S	34°54'25.05" W	-7,180451	-34,906959
12	7°08'49.53" S	34°59'17.67" W	-7,147094	-34,988243
13	7°07'51.98" S	34°54'15.97" W	-7,131106	-34,904436
14	7°20'19.62" S	35°20'18.40" W	-7,338786	-35,338445
15	6°37'26.40" S	35°16'54.41" W	-6,624002	-35,281781
16	7°07'46.64" S	34°52'04.11" W	-7,129625	-34,867809
17	6°56'41.38" S	34°54'27.51" W	-6,944828	-34,907643
18	6°35'35.72" S	35°03'32.32" W	-6,593257	-35,058978
19	7°09'42.13" S	34°49'12.76" W	-7,161704	-34,820211
20	7°05'57.27" S	34°50'50.95" W	-7,099243	-34,847487
21	7°20'05.43" S	34°57'03.25" W	-7,334842	-34,950905
22	7°10'48.84" S	34°53'38.32" W	-7,180235	-34,893978
23	7°23'09.07" S	35°08'54.86" W	-7,385855	-35,148573
24	7°12'39.95" S	34°49'43.81" W	-7,211099	-34,828839
25	6°48'56.51" S	35°06'03.85" W	-6,815699	-35,101072
26	7°05'13.77" S	35°13'20.15" W	-7,08716	-35,222266
27	7°07'04.10" S	34°57'46.87" W	-7,117807	-34,963022
28	7°06'55.34" S	34°50'03.18" W	-7,115374	-34,834218
29	7°35'09.32" S	35°05'20.25" W	-7,585923	-35,08896

Fonte: Autor (2019)

Posteriormente foi possível gerar uma matriz de deslocamento em quilômetro por hora conforme Figura 02, que consistiria no banco de dados de onde seriam extraídas as informações para implementação da modelagem matemática.

**Figura 02** - Matriz de distância em Km/h

MATRIZ DE KM/hr																													
Cidades	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
1		17,06	57,924	22,549	16,616	7,186	14,196	31,083	36,704	58,581	7,38	17,701	12,137	69,929	88,936	5,988	41,388	95,802	10,78	12,44	25,386	7,603	53,824	12,755	57,608	59,724	14,512	12,135	64,531
2	12,226		68,083	9,686	26,775	6,663	24,355	41,243	46,864	68,74	17,539	27,861	10,344	80,089	99,096	10,545	51,548	105,962	16,574	6,421	35,545	17,762	63,984	20,444	67,768	69,884	24,672	6,117	74,69
3	54,007	68,265		73,754	40,121	58,337	44,707	78,113	83,734	26,849	50,557	64,731	59,167	78,78	135,966	57,169	88,418	142,832	67,57	63,645	37,551	49,968	56,038	49,551	104,638	106,754	61,542	63,341	32,799
4	18,983	7,132	74,84		33,532	13,42	31,112	48	53,621	75,497	24,296	34,618	17,1	86,846	105,853	17,302	58,305	112,719	23,331	13,178	42,302	24,519	70,741	27,201	74,525	76,641	31,429	12,874	81,447
5	25,228	39,486	41,308	44,975		29,558	15,928	49,334	54,955	41,965	21,778	35,952	30,388	60,441	107,187	28,39	59,639	114,053	38,791	34,866	8,77	21,19	37,699	35,99	75,859	77,975	32,763	34,562	47,914
6	9,329	10,097	65,186	15,586	23,878		21,458	33,68	39,301	65,843	14,642	20,298	7,418	72,526	91,533	4,002	43,985	98,399	10,367	5,477	32,648	14,865	56,421	20,354	60,205	62,321	17,109	4,061	71,793
7	12,782	27,04	43,902	32,529	2,594	17,112		36,888	42,509	44,559	9,331	23,506	17,942	63,035	94,741	15,944	47,193	101,607	26,345	22,42	11,364	8,743	40,293	28,065	63,413	65,529	20,317	22,116	50,509
8	28,19	42,449	77,845	47,938	36,537	31,089	34,117		43,869	62,094	27,301	13,068	28,009	55,446	96,101	30,733	48,553	102,967	41,754	37,829	45,307	27,524	39,34	38,128	64,773	45,241	18,81	37,524	84,452
9	41,968	56,227	91,623	61,716	50,315	44,867	47,895	50,484		92,28	41,079	37,102	41,787	89,33	61,715	44,511	16,009	68,582	55,532	51,607	59,085	41,302	73,225	51,906	30,387	50,954	32,471	51,302	98,23
10	59,031	73,289	26,804	78,778	45,145	63,361	49,73	56,465	88,758		55,58	58,973	64,191	45,495	140,99	62,193	93,442	147,856	72,594	68,669	42,575	54,992	22,753	69,793	109,662	79,519	66,566	68,365	24,955
11	5,902	20,16	51,77	25,649	10,462	10,232	8,042	30,008	35,629	52,427		16,626	11,062	68,854	87,861	9,064	40,313	94,727	19,465	15,54	19,219	1,864	48,148	15,84	56,533	58,649	13,437	15,236	58,364
12	16,028	30,287	65,683	35,776	24,375	18,927	21,955	15,648	31,707	66,34	15,139		15,847	54,494	83,939	18,571	36,391	90,805	29,592	25,667	33,145	15,362	38,389	25,966	52,611	44,29	6,648	25,362	72,29
13	8,334	22,593	57,989	28,082	16,681	5,537	14,261	26,476	32,097	58,646	7,445	13,094		65,322	84,329	5,556	36,781	91,195	21,898	17,973	25,451	7,668	49,217	18,272	53,001	55,117	9,905	17,668	64,596
14	66,516	80,775	80,638	86,264	62,791	69,415	72,443	48,888	82,195	45,49	65,627	51,394	66,335		134,427	69,059	86,879	141,293	80,08	76,155	60,222	65,85	24,63	76,454	103,099	42,015	57,136	75,85	62,109
15	85,621	99,88	135,276	105,369	93,968	88,52	91,548	94,137	62,156	135,933	84,732	80,755	85,44	107,922		88,164	90,492	58,232	99,185	95,26	102,738	84,955	116,878	95,559	38,857	68,748	76,124	94,955	141,883
16	7,441	12,104	63,298	17,593	21,99	2,391	19,57	36,457	42,078	63,955	12,754	23,075	5,686	75,303	94,31		46,762	101,176	11,409	7,484	30,76	12,977	59,198	21,396	62,982	65,098	19,886	7,18	69,905
17	40,854	55,113	90,509	17,906	49,201	43,753	46,781	49,37	16,009	91,166	39,965	35,988	40,673	88,216	92,122	43,397		98,988	54,418	50,493	57,971	40,188	72,111	50,792	60,794	63,384	31,357	50,188	97,116
18	95,402	109,661	145,057	115,15	103,749	98,301	101,329	103,918	71,937	145,714	94,513	90,536	95,221	117,703	97,542	97,945	100,273		108,966	105,041	112,519	94,736	126,659	105,34	48,638	78,529	85,905	104,736	151,664
19	9,226	14,989	61,658	20,478	23,774	10,231	21,354	38,242	43,863	65,739	145,38	24,86	15,737	77,088	96,095	11,806	48,547	102,961		10,369	32,544	14,761	60,983	10,761	64,767	66,883	21,671	7,449	71,689
20	14,299	5,866	70,156	11,555	28,848	6,022	26,428	43,316	48,937	70,813	19,625	29,934	10,288	82,162	101,169	12,618	53,621	108,035	9,618		37,618	19,835	66,057	19,605	69,841	71,957	25,745	4,078	76,763
21	29,314	43,572	33,274	49,061	15,427	33,644	20,013	53,42	59,041	33,931	25,863	40,038	34,474	52,407	111,273	32,476	63,725	118,139	42,877	38,952		25,375	29,665	40,076	79,945	82,061	36,849	38,648	39,88
22	5,398	19,656	52,492	25,145	11,183	9,727	8,763	29,503	35,124	53,148	1,96	16,121	10,557	68,349	87,356	8,559	39,808	94,222	18,961	15,036	19,954		48,882	11,423	56,028	58,144	12,932	14,732	59,998
23	51,341	65,6	57,902	71,089	40,055	54,24	44,641	33,711	67,02	22,753	50,452	36,219	51,16	24,635	119,252	53,884	71,704	126,118	64,905	60,98	37,486	49,903		64,704	87,924	56,765	41,961	60,675	39,373
24	10,165	24,946	51,065	30,435	25,638	20,188	30,224	39,181	44,802	67,603	13,622	25,799	20,235	78,027	97,034	21,763	49,486	103,9	11,061	20,326	34,408	11,352	63,337		65,706	67,822	22,61	17,406	73,552
25	56,728	70,987	106,383	76,476	65,075	59,627	62,655	65,244	33,263	107,04	55,839	51,862	56,547	79,029	39,884	59,271	61,599	46,751	70,292	66,367	73,845	56,062	87,985	66,666		39,855	47,231	66,062	112,99
26	59,395	73,654	109,05	79,143	67,742	62,294	65,322	41,765	52,952	70,945	58,506	44,273	59,214	40,93	71,43	61,938	81,31	78,297	72,559	69,034	76,512	58,729	55,706	69,333	40,103		35,191	68,729	87,564
27	13,197	27,456	62,852	32,945	21,544	16,096	19,124	21,713	28,324	63,509	12,308	8,331	13,016	60,559	80,556	15,74	33,008	87,422	26,761	22,836	30,314	12,531	44,454	23,135	49,228	35,329		22,531	69,459
28	11,343	8,881	67,2	14,37	25,892	5,087	23,472	40,36	45,981	67,857	16,669	26,978	11,32	79,206	98,213	8,283	50,665	105,079	6,963	4,261	34,662	16,879	63,101	16,95	66,885	69,001	23,789		73,807
29	63,735	77,993	31,507	83,482	49,848	68,064	54,434	73,145	93,461	26,638	60,284	74,458	68,894	62,174	145,693	66,896	98,145	152,559	77,298	73,373	47,278	59,696	39,433	74,497	114,365	96,199	71,269	73,069	

Fonte: Autor (2019)

Com os dados coletados referentes ao deslocamento entre as 29 subestações, foi possível elaborar o modelo matemático bem como a interface no *Microsoft Excel*. Essa interface permitiu sequenciar a rota pré-estabelecida visando otimizar a distância percorrida.

#### 4. Formulação matemática

De acordo com Souza (2009), quando assume-se o grafo  $G = (Cidades; A)$ , pode-se obter a seguinte formulação matemática:

(a) Conjuntos

$C$ : Conjunto de cidades (clientes)

(b) Dados

$d_{ij}$ : Distância da cidade  $i$  para a cidade  $j$

(c) Variáveis de decisão:

$$x_{ij} : \begin{cases} 1, & \text{se o arco } (i; j) \text{ for utilizado} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$f_{ij}$ : quantidade de fluxo enviada da cidade  $i$  para a cidade  $j$

(c) Função objetivo

$$\min \sum_{i \in \text{Cidades}} \sum_{j \in \text{Cidades}} d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

(d) Restrições

$$\sum_{i \in \text{Cidades}} x_{ik} = 1 \quad \forall k \in \text{Cidades} \quad (2)$$

$$\sum_{j \in \text{Cidades}} x_{kj} = 1 \quad \forall k \in \text{Cidades} \quad (3)$$

$$\sum_{i \in \text{Cidades}} f_{ik} - \sum_{j \in \text{Cidades}} f_{kj} = 1 \quad \forall k \in \text{Cidades} \mid k \neq 1 \quad (4)$$

$$f_{ij} \leq (n - 1)x_{ij} \quad \forall i \in \text{Cidades}, \quad \forall j \in \text{Cidades} \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \text{Cidades}, \quad \forall j \in \text{Cidades} \quad (6)$$

$$f_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in \text{Cidades}, \quad \forall j \in \text{Cidades} \quad (7)$$

A equação (1) que representa a função objetivo deixa claro que a minimização das distâncias percorridas é o foco principal desse problema.

Entretanto, existem restrições que são essenciais, como por exemplo, as equações (2) e (3) que garantem que a cada cidade  $k$  só chegue um arco, e de que cada cidade  $k$  só saia um arco.

As restrições (4) e (5) garantem a eliminação dos subciclos. Na primeira delas, impõe-se que o fluxo que chega a uma cidade  $k$  menos o que sai de  $k$  seja igual a 1 (exceto para a cidade origem, cujo índice é 1).

Já na segunda, o fluxo máximo que passa em um arco usado no percurso é inferior a  $n - 1$ , onde  $n$  é o número de cidades, e quando um arco não é usado ( $x_{ij} = 0$ ) então o fluxo é nulo (SOUZA, 2009).

## 5. Caracterização do problema

O estudo de caso foi realizado em uma concessionária de energia elétrica localizada no Brasil, e o processo existente é formado por subsistemas (as equipes de manutenção das subestações) que ao trabalharem e interagirem de forma eficiente garante a funcionalidade do mesmo.

Assim, o processo de manutenção em uma concessionária de energia elétrica pode ser considerado um sistema como sendo “[...] um conjunto de partes interagentes e interdependentes, que formam um todo unitário com determinado objetivo e efetuam determinada função” (ALMEIDA, 2011, p. 15).

Analisando a concessionária como um sistema conforme a Figura 03, podem-se observar como inputs os equipamentos, peças, ferramentas, veículos de transporte, componentes da equipe e conhecimento. Posteriormente, essas entradas são processadas e auxiliam na execução dos serviços em subestações. Por fim, obtêm-se as saídas, que se apresentam na forma de serviço finalizado ou não.

**Figura 03** - Esquema conceitual de um sistema



**Fonte:** Autor (2019)

Os subsistemas são representados pelas equipes de manutenção, que são consideradas a peça chave no processo, pois são responsáveis diretas pelos resultados obtidos nos indicadores de desempenho. Entre esses indicadores encontram-se a produtividade da equipe, tempo de deslocamento e entre outros.

A Figura 04 representa o fluxograma, onde se observa que o deslocamento de saída da base (sede), bem como o deslocamento entre as subestações é considerado desvio, contribuindo para uma diminuição do tempo produtivo, refletindo no não alcance de metas internas referentes à produtividade de equipes.

**Figura 04** - Fluxograma de deslocamento



Fonte: Autor (2019)

A disponibilidade individual de cada colaborador da equipe, refere-se a uma jornada de trabalho de 8 horas diárias, durante os 5 dias úteis da semana, isentando-se do horário do almoço, totalizando 40 horas semanais. Logo, a disponibilidade total corresponde ao somatório da disponibilidade de cada componente da equipe.

As equipes formadas por quatro pessoas em um único carro, diariamente saem da sede e devem visitar todas as subestações que constam na sua ordem de trabalho e voltar para a sede. Considera-se que as equipes não possuem um número limitado de serviços para executarem nas subestações, mas a média por dia de visitas em subestações varia de 5 a 10 clientes, possuindo um total de 29 clientes.

Atualmente na organização a determinação das rotas é feita prioritariamente baseada no conhecimento tácito do programador. Como instrumentos auxiliares, ele utiliza a cartografia, e vários tipos de mapas. Dessa forma, observa-se uma grande deficiência nesse processo que pode resultar em rotas imprecisas, e conseqüentemente deslocamentos maiores.

Diante desse cenário e com a finalidade de verificar o impacto da diminuição dos deslocamentos na produtividade das equipes de manutenção, utilizou-se a Pesquisa Operacional (PO) na busca pela otimização das rotas. De forma indireta essa otimização

contribuiria para que as equipes pudessem ser alocadas em outras atividades que também agregassem valor ao processo.

## 6. Metodologia de resolução

Para possibilitar a resolução do problema, ou seja, minimizar as distâncias utilizou-se a biblioteca integrada chamada de UFLP no solver que acompanha a *Microsoft Excel*. Em um primeiro momento foi necessário criar uma matriz de distâncias mínimas de deslocamento com o auxílio do Google Maps. Essa primeira matriz foi criada para que fossem introduzidas as distâncias das 29 subestações. Posteriormente o usuário indicava na interface do *Excel* as cidades que ele desejava criar uma rota. Essa indicação gerava outra matriz, que era lida pelo programa e gerava a rota com a menor distância percorrida.

Por fim, para avaliar o impacto da otimização fez-se uma comparação entre o resultado obtido e o gerado pelo programador. Ou seja, escolheram-se três rotas feitas na última semana por uma equipe e que foi sequenciada de forma manual, e comparou-se com o resultado gerado pelo modelo de programação.

As figuras seguintes representam uma rota qualquer, cujo objetivo é mostrar a metodologia de resolução. A Figura 05 representa a linguagem computacional adotada.

**Figura 05** - Programação

```
Sub Botão94_Clique()  
  
Dim instancia As String  
Dim r As Integer  
Dim f As Long  
  
instancia = Sheets("escolher").Cells(3, 35).value ' Caso fosse r  
  
Dim c As Integer 'cidades  
c = Sheets(instancia).Cells(2, 2).value  
r = 1 ' Porque o problema só gera uma rota  
  
Dim i, j As Integer  
Dim distancia() As Long  
ReDim distancia(c, c) As Long ' onde (c,c) é a matriz que está já c  
  
For i = 1 To c  
    For j = 1 To c  
        distancia(i, j) = Sheets(instancia).Cells(i + 4, j + 1).value
```

**Fonte:** Autor (2019)

A Figura 06 representa o arquivo .lp, que expõe o resultado gerado com a solução do problema.

**Figura 06** - Arquivo .lp

```
Solution LOG:  
f_1_3 = 4  
f_2_4 = 2  
f_3_2 = 3  
f_4_5 = 1  
x_1_3 = 1  
x_2_4 = 1  
x_3_2 = 1  
x_4_5 = 1  
x_5_1 = 1
```

**Fonte:** Autor (2019)

A Figura 07 representa a interface criada na planilha do *Excel*, no qual possui botões que executam a programação do VBA, posteriormente aparece uma mensagem se a solução ótima foi encontrada ou não.

**Figura 07** - Interface

# Instancia

Dados

TOTAL Km

128,00

QUANTIDADE

4

SAÍDA DA SEDE

1 - SEDE

LOCALIDADES

SEQUÊNCIA DA ROTA

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

1

3

2

1

Fonte: Elaboração pelo autor por meio do Excel 2010

## 7. Resultados

Foram coletadas 3 rotas realizadas anteriormente no setor realizadas com um veículo Volkswagen Amarok, que utiliza como combustível o óleo diesel S10 (Tomou como base a média de valor do óleo diesel correspondente a R\$3,05), tem consumo médio de 8,8 km/l na cidade e é ocupado por 4 técnicos. No qual foram entregues as sequências das subestações para que pudessem seguir a rota proposta pelo profissional responsável por realizar a programação de serviços do setor. Porém, o setor leva em consideração o total de deslocamento, prioridade de serviços e prazo a ser cumprido.

O nosso primeiro cenário de sequenciamento da rota proposto pelo setor à equipe correspondeu: 1→22→18→3→23→25→26→9→1. A rota adotada resultou em 522Km, 8 horas, 2 minutos totalizados pelo Google Maps. E a tabela 2 representa o resultado obtido utilizando a modelagem do caixeiro viajante, com uma redução de 160 km, ou seja, 30,6% no percurso percorrido.

**Tabela 2:** Resultados rota 1

	ROTA 01 ATUAL	ROTA 01 PROPOSTA
	1	1
	22	9
	18	25
	3	18
	23	26
	25	23
	26	18
	9	9
	1	1
<b>Distância Total:</b>	522 Km	362 Km

**Fonte:** Autor (2019)

O segundo cenário de sequenciamento de rota proposto pelo setor à equipe, é similar a rota 01, diferenciando apenas a existência do cliente 21, logo correspondeu: 1→21→18→3→23→25→26→9→1. A rota adotada resultou 564 km, 8 horas, 28 minutos totalizados pelo Google Maps. Mediante a tabela 3, o resultado obtido utilizando a modelagem do caixeiro viajante, com uma redução de 192 Km, ou seja, 34,04% no percurso percorrido

**Tabela 3:** Resultados rota 2

	ROTA 02 ATUAL	ROTA 02 PROPOSTA
	1	1
	21	21
	18	3
	3	23
	23	26
	25	25
	26	18
	9	9
	1	1
<b>Distância Total:</b>	564 Km	372 Km

Fonte: Autor (2019)

O nosso terceiro e último cenário de sequenciamento de rota proposto pelo setor à equipe correspondeu: 1→19→27→4→26→1. A rota adotada resultou 202 km, 3 horas, 34 minutos totalizados pelo Google Maps. Mediante a tabela 4, o resultado obtido utilizando a modelagem do caixeiro viajante, com uma redução de 46 Km, ou seja, 22,77% no percurso percorrido.

**Tabela 4:** Resultados rota 3

	ROTA 03 ATUAL	ROTA 03 PROPOSTA
	1	1
	19	19
	27	4
	4	26
	26	27
	1	1
<b>Distância Total:</b>	202 Km	156 Km

Fonte: Autor (2019)

Portanto, a modelagem proposta através da introdução de restrições, não permitiu subciclos e disponibilizou uma solução ótima referente às cidades estabelecidas representadas pelos nós. Cujos modelos propostos não permitem passar pela mesma cidade duas vezes, porém estabelece-se que deve sair da base e retornar ao final do percurso.

No final dos três cenários citados anteriormente, o total de distância percorrida pelas equipes mediante a rota emitida pelo VBA foi menor, obtendo uma redução de considerável da distância total a ser percorrida, contribuindo para diminuição de despesas. Logo, observa-se o

total de tempo desperdiçado em deslocamento improdutivo poderia ser aproveitado de forma bastante satisfatória.

Na tabela 5, tomando como base a rota de número 1, com o intuito de mostrar o total economizado obtêm-se então os seguintes dados:

**Tabela 5:** Resultados rota 1

Quilometragem reduzida (Km)	Consumo Médio (Km/Litros)	Total de Diesel economizado (Litros)	Preço do Diesel utilizado	Total economizado
160	8,8	18,18	R\$ 3,05	R\$ 55,40

Tempo reduzido (Minutos)	Custo Homem-hora	Total economizado (Equipe composta por 4 pessoas)
122	R\$ 8,30	R\$ 58,80

Redução média na rota 01:	R\$ 114,20
---------------------------	------------

**Fonte:** Autor (2019)

## 8. Conclusões

Através do tratamento e posteriormente análise dos dados, foi possível demonstrar qual foi à rota traçada pela concessionária e qual seria a melhor rota para a equipe ter realizado através do modelo do caixeiro viajante.

A incorporação da programação em VBA permitiu uma interface de fácil manuseio e que com apenas um clique no botão geraria uma rota ótima. Essa ferramenta não traria custos adicionais para concessionária, pois o *Microsoft Excel*, o VBA e o UFFLP podem ser utilizados de forma gratuita. A programação permitiu inúmeras combinações entre o conjunto de cidades, sendo a partida e a chegada à sede. Outro ponto que chamou atenção foi o tempo de resolução do problema, que durou menos de 1 segundo.

Foi possível observar que com a utilização da programação semanal realizada de forma manual, a organização continuará de forma constante a adquirir perdas ao processo. Entretanto, se for utilizado à interface desenvolvida nesse trabalho, a organização terá um melhor monitoramento das equipes, e uma diminuição de custos com a redução dos deslocamentos.

Por fim afirma-se que as sequências de rotas disponibilizadas pela modelagem foram totalmente satisfatórias, mediante a disponibilização de informações para comparar os cenários. Com a intenção de implementar estratégias que visam aproveitar da melhor forma possível o tempo disponível das equipes, podem ser citados como tópicos a serem trabalhados posteriormente desde a prioridade de serviço, atribuindo pesos, tempo disponível total da equipe de forma semanal ou diária, tempo de *setup* entre serviços, tempo de almoço e prazo estipulado do serviço.

## REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO-8402, Gestão da qualidade e garantia – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

AIOSA, R. **O que é VBA?** São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.escolaexcel.com.br/2011/08/o-que-e-vba.html>. Acesso em: 19 out. 2018.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia**. Editora Campus, 2007.

ALMEIDA, Mário de Souza. FREITAS, Claudia Regina. SOUZA, Irineu Manoel de. **Gestão do conhecimento para tomada de decisão**. São Paulo: Atlas, 2011.

CAIXEIRO. Disponível em <<http://www.mat.ufrgs.br/~portosil/caixeiro.html>> Acesso em: 08 Set. 2018.

COELHO, Leandro Callegari. **Série Pesquisa Operacional – Problema de Roteamento de Veículos**. 2010. Disponível em: < <https://www.logisticadescomplicada.com/serie-pesquisa-operacional-%E2%80%93-problema-de-roteamento-de-veiculos/> > Acesso em: 17 nov. 2018.

GAPSON Analytics. **UFFLP**. 2018. Disponível em: <http://www.gapso.com.br/ufflp/>. Acesso em: 17 jan. 2018

LACHTERMACHER, Gerson. **Pesquisa Operacional na tomada de decisões: Modelagem em Excel**. Rio de Janeiro. Elsevier, 2007.

MANGUINO, João Luiz Veiga. **PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULO COM FROTA MISTA, JANELAS DE TEMPO E CUSTOS ESCALONADOS**. 2013. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

MAPS, **Google**. Disponível em <<https://www.google.com.br/maps>> Acesso em: 09 de set. 2018.

MARQUES, G. M. et al. **Aplicação da programação dinâmica na substituição de equipamentos**. Revista Árvore, 2005.

PARANHOS, F. **Inserindo um marcador com comando VBA**. Rio Grande do Sul, 2012. Disponível em:<<https://www.aprenderexcel.com.br/2013/vba/inserindo-um-marcador-com-comando-vba>>Acesso em: 17 nov. 2018.

PISINGER, D. & ROPKE, S. **A general heuristic for vehicle routing problems**. Computers & Operations Research, 2007

Plataforma UFFLP. **Integrando Programação Inteira Mista e Planilhas de Cálculo de forma simples e acessível.** Disponível em < <http://www.gapso.com.br/ufflp/> > Acesso em: 17 nov. 2018.

SIQUEIRA, Paulo Henrique. **Uma nova abordagem na resolução do problema do caixeiro viajante.** Curitiba, 2005. Disponível em <<https://www.acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/2562/paulohsTese.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 19 nov. 2018.

SOUZA, Marcone Jamilson Freita. **Otimização Combinatória.** Apostila. 2009. Disponível em < <http://www.decom.ufop.br/marcone/Disciplinas/OtimizacaoCombinatoria/OtimizacaoCombinatoria.pdf> > Acesso em: 10 nov. 2018.

TOTH, P. & VIGO, D. **The Vehicle Routing Problem.** SIAM, 2002.